



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE BRUÑIDO CON BOLA,
ADAPTADA A UN TORNO**



Autor: Álvaro Marco Villanueva

Director: Dr. Giovanni Gómez

Departamento EM

Convocatoria: Octubre 2017

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| ÍNDICE FIGURAS..... | 4 |
| ÍNDICE TABLAS..... | 8 |
| RESUMEN..... | 9 |
| RESUM..... | 9 |
| ABSTRACT..... | 10 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 1.1. MOTIVACIÓN..... | 11 |
| 1.2. OBJETO DEL PROYECTO..... | 12 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 12 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 13 |
| 1.3. MARCO TEÓRICO..... | 13 |
| 1.3.1. RUGOSIDAD SUPERFICIAL..... | 13 |
| 1.3.2. MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD..... | 13 |
| 1.3.3. TÉCNICAS DE ACABADO SUPERFICIAL..... | 14 |
| 2. ESTADO DEL ARTE..... | 16 |
| 3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA..... | 33 |
| 3.1. PROPUESTAS DE DISEÑO..... | 33 |
| 3.1.1. PRIMERA PROPUESTA DE DISEÑO..... | 33 |
| 3.1.2. SEGUNDA PROPUESTA DE DISEÑO..... | 35 |
| 3.1.3. SOLUCIÓN ADOPTADA..... | 37 |
| 3.2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO..... | 38 |
| 3.3. ELEMENTOS NORMALIZADOS..... | 42 |
| 3.4. OTROS ELEMENTOS DEL DISEÑO..... | 45 |
| 3.5. PLANOS..... | 46 |
| 4. CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS..... | 48 |
| 4.1. DEFORMACIONES EN CUERPOS ESVELTOS..... | 48 |
| 4.2. FACTOR DE SEGURIDAD..... | 54 |
| 4.3. SIMULACIONES DE LAS PIEZAS..... | 59 |
| 4.4. TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMÉTRICAS..... | 62 |
| 5. FABRICACIÓN DE LA HERRAMIENTA..... | 66 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1. LISTA DE MATERIALES..... | 66 |
| 5.2. PIEZAS EN BRUTO..... | 66 |
| 5.3. HOJAS DE RUTA..... | 77 |
| 6. VALORACIÓN ECONÓMICA..... | 78 |
| 6.1. SUBPRODUCTO..... | 78 |
| 6.2. COSTES ASOCIADOS A LA FABRICACIÓN..... | 79 |
| 6.3. COSTES DE INGENIERÍA Y PROTOTIPADO..... | 81 |
| 6.4. PRESUPUESTO FINAL..... | 82 |
| 7. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL..... | 83 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 85 |
| 9. TRABAJOS FUTUROS..... | 86 |
| 10. BIBLIOGRAFIA..... | 87 |

ANEXO 1. PLANOS

ANEXO 2. HOJAS DE RUTA

ANEXO 3. TABLAS DE TOLERANCIAS

ÍNDICE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama esquemático para el proceso de bruñido con bola..... | 12 |
| Figura 2. Perfil de rugosidad..... | 13 |
| Figura 3. Palpador..... | 14 |
| Figura 4. Herramienta de bruñido de cilindros mediante arranque de viruta..... | 15 |
| Figura 5. Ejemplo de herramienta de bruñido de interiores mediante rodillos..... | 15 |
| Figura 6. Proceso de bruñido, según Sihou et al. (2003)..... | 17 |
| Figura 7. Influencia de la velocidad de rotación y de la fuerza de contacto sobre la resistencia al desgaste de la pieza pulida..... | 18 |
| Figura 8. Esquema utilizado por Ainhoa Celaya y otros, Para desarrollar un modelo del proceso de bruñido con bola..... | 20 |
| Figura 9. Gráficos comparativos de los resultados obtenidos por M.M. El-Khabeery y M.H. El-Axir (2011)..... | 21 |
| Figura 10. Comparación de tensiones residuales en probetas deformadas con Ti-6Al-4V sometidos a pulido de bolas (LPD) y granallado (GBP), según Prevéy (2002)..... | 22 |
| Figura 11. Representación esquemática del proceso de bruñido con bola..... | 24 |
| Figura 12. Variación de las distancias entre planos, en función del seno del ángulo y del valor obtenido de las tensiones residuales, para la probeta 1 (radio 100 mm)..... | 24 |
| Figura 13. Variación de las distancias entre planos, en función del seno del ángulo y del valor obtenido de las tensiones residuales, para la probeta2 (radio 50 mm)..... | 25 |
| Figura 14. Rugosidad superficial de la pieza bruñida con cada bola-herramienta. AL-Alúmina, CC-Carbono Cementado, SN-Nitruro de Silicio, SC-Carburo de Silicio. Pieza JIS-S38C, lubricante VS, velocidad de bruñido 100 m/min..... | 28 |
| Figura 15. Micrografía escaneada electrónicamente de una pieza bruñida con bola-herramienta de (a) nitruro de silicio y (b) carburo de silicio..... | 29 |
| Figura 16. Efecto del lubricante y material-herramienta en la rugosidad superficial..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Herramienta de bruñido para interior de cilindros..... | 31 |
| Figura 18. Fotos de piezas bruñidas: (a) superficie inclinada y (b) con curvatura..... | 32 |
| Figura 19. Localización de la herramienta en el torno..... | 33 |
| Figuras 20 y 21. Fotografías de la primera propuesta de diseño de la herramienta de bruñido de interiores..... | 34 |
| Figura 22. Mecanismo de la segunda propuesta de diseño..... | 35 |
| Figura 23. Idea conceptual de la herramienta que se va a diseñar..... | 37 |
| Figura 24. Base de la herramienta..... | 38 |
| Figura 25. Brazo de la herramienta..... | 39 |
| Figura 26. Pieza guía..... | 39 |
| Figura 27. Tapa muelle..... | 40 |
| Figura 28. Cabezal de la herramienta..... | 41 |
| Figura 29. Casquillo del cabezal. | 41 |
| Figura 30. Muelle B13-038..... | 42 |
| Figura 31. Muelle seleccionado del catálogo de todomuelles.com..... | 42 |
| Figura 32. Rodamiento seleccionado NX 7 ZTN de SKF..... | 43 |
| Figura 33. Dimensiones del rodamiento NX 7 ZTN..... | 43 |
| Figura 34. Datos técnicos del rodamiento NX 7 ZTN..... | 44 |
| Figura 35. Dimensiones principales del tornillo con cabeza cilíndrica allen DIN-912..... | 44 |
| Figura 36. Bola bruñidora de acero al cromo..... | 45 |
| Figura 37. Esferas de rodadura..... | 45 |
| Figura 38. Detalle del ensamblaje de la bola bruñidora en el cabezal..... | 46 |
| Figura 39. Ensamblaje de la herramienta acabada..... | 47 |
| Figura 40. Vista explosionada de la herramienta de bruñido con bola..... | 47 |
| Figura 41. Esquema de la distribución de fuerzas que actúan sobre el pasador..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 42. Diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores..... | 49 |
| Figura 43. Primer corte pasador..... | 49 |
| Figura 44. Brazo de la herramienta para el cálculo de deformaciones..... | 50 |
| Figura 45. Primer corte brazo..... | 51 |
| Figura 46. Segundo corte brazo..... | 51 |
| Figura 47. Distribución de fuerzas momento virtual..... | 52 |
| Figura 48. Primer corte brazo momento virtual..... | 52 |
| Figura 49. Segundo corte brazo momento virtual..... | 53 |
| Figura 50. Tensiones en la sección crítica del pasador..... | 55 |
| Figura 51. Tensiones en la sección crítica del cilindro de la base..... | 55 |
| Figura 52. Tensiones en la sección crítica del brazo..... | 56 |
| Figura 53. Tensiones en la sección crítica de la pieza guía..... | 57 |
| Figura 54. Tensiones en la sección crítica de la tapa..... | 57 |
| Figura 55. Tensiones en la sección crítica del cabezal..... | 58 |
| Figura 56. Deformaciones en la base de la herramienta..... | 59 |
| Figura 57. Deformaciones en el brazo de la herramienta..... | 60 |
| Figura 58. Deformaciones en la pieza guía..... | 60 |
| Figura 59. Deformaciones en la tapa del muelle..... | 61 |
| Figura 60. Valores de las tolerancias para la forma cilíndrica y la variación total para las diferentes clases de tolerancia de rodamientos..... | 61 |
| Figura 61. Etiquetas para las tolerancias geométricas..... | 62 |
| Figura 62. Tabla para la selección de sobreespesores..... | 65 |
| Figura 63. Tabla de espesores para distintos tubos..... | 67 |
| Figura 64. Proceso de fabricación del tubo soldado..... | 69 |
| Figura 65. Cuerpo de la herramienta en bruto..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 66. Pasador de la herramienta en bruto..... | 70 |
| Figura 67. Cilindro de la herramienta en bruto. | 71 |
| Figura 68. Tapa roscada en bruto. | 71 |
| Figura 69. Brazo de la herramienta en bruto. | 72 |
| Figura 70. Cilindros de la pieza guía en bruto. | 73 |
| Figura 71. Gancho de la pieza guía en bruto. | 74 |
| Figura 72. Punta del cabezal en bruto. | 74 |
| Figura 73. Rosca del cabezal en bruto. | 75 |
| Figura 74. Casquillo en bruto. | 76 |
| Figura 75. Herramienta de cálculo de Sandvik Coromant..... | 77 |

ÍNDICE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Puntos fuertes y puntos débiles de la primera propuesta de diseño..... | 34 |
| Tabla 2. Puntos fuertes y puntos débiles de la segunda propuesta de diseño..... | 36 |
| Tabla 3. Factores de seguridad de las piezas de la herramienta..... | 58 |
| Tabla 4. Materiales de las distintas piezas que conforman la herramienta..... | 66 |
| Tabla 5. Desglose de cada una de las partes que conforman las piezas..... | 67 |
| Tabla 6. Diámetros para poder mecanizar las roscas métricas estándar..... | 68 |
| Tabla 7. Características del cuerpo de la herramienta en bruto..... | 69 |
| Tabla 8. Características del pasador de la herramienta en bruto..... | 70 |
| Tabla 9. Características del brazo de la herramienta en bruto..... | 72 |
| Tabla 10. Características de los cilindros de la pieza guía en bruto..... | 73 |
| Tabla 11. Características de la punta del cabezal en bruto..... | 74 |
| Tabla 12. Características de la rosca del cabezal en bruto..... | 75 |
| Tabla 13. Características del casquillo en bruto..... | 76 |
| Tabla 14. Aprovechamiento y valoración económica de las piezas..... | 79 |
| Tabla 15. Costes de fabricación de la herramienta..... | 80 |
| Tabla 16. Costes de ingeniería..... | 81 |
| Tabla 17. Costes del prototipo..... | 82 |
| Tabla 18. Costes totales..... | 82 |

RESUMEN

El bruñido con bola es una operación de deformación plástica en frío, que presenta una serie de ventajas en el campo de las operaciones de acabado, ya que mejora varias propiedades de las piezas en una sola operación. En el presente proyecto se profundiza en dicho proceso mediante el diseño de una herramienta.

Dicha herramienta ha sido diseñada para adaptarse al carro portaherramientas de un torno, con una morfología que permita aplicar la fuerza de bruñido en el sentido positivo del eje Y del torno. Como consecuencia, el resultado final ha sido una herramienta que puede bruñir interiores de piezas con forma tubular.

Una vez diseñado el mecanismo se realizan los cálculos correspondientes para determinar los factores de seguridad y dimensionar la herramienta, así como las tolerancias dimensionales y geométricas. Además se simulan todas las piezas en SolidWorks para comprobar que las deformaciones no son excesivas y los cálculos se hayan realizado correctamente.

Como punto final, se realiza el estudio para la fabricación de la herramienta mediante un torno convencional, desde las dimensiones iniciales de las piezas en bruto laminadas hasta la herramienta completamente acabada.

RESUM

El brunyit amb bola és una operació de deformació plàstica en fred, que presenta una sèrie d'avantatges en el camp de les operacions d'acabat, ja que millora diverses propietats de les peces en una sola operació. En el present projecte es profunditza en aquest procés mitjançant el disseny d'una eina.

Aquesta eina ha estat dissenyada per adaptar-se al carro porta eines d'un torn, amb una morfologia que permeti aplicar la força de brunyit en el sentit positiu de l'eix Y del torn. Com a conseqüència, el resultat final ha estat una eina que pot brunyir interiors de peces amb forma tubular.

Un cop dissenyat el mecanisme es realitzen els càlculs corresponents per determinar els factors de seguretat i dimensionar l'eina, així com les toleràncies dimensionals i geomètriques. A més, totes les peces han sigut simulades en SolidWorks per comprovar que les deformacions no són excessives i els càlculs s'hagin realitzat correctament.

Com a punt final, es realitza l'estudi per a la fabricació de l'eina mitjançant un torn convencional, des de les dimensions inicials de les peces en brut laminades fins l'eina completament acabada.

ABSTRACT

Ball burnishing is a cold plastic deformation operation which has a number of advantages in the field of finishing operations, as it improves various properties of the specimens in a single operation. In the present project the process is deepened through the design of a tool.

Said tool has been designed to adapt to the carriage of tools of a lathe, with a morphology that allows to apply the burnishing force in the positive direction of the Y axis of the lathe. As a consequence, the final result has been a tool that can burnish interiors of tubular shaped pieces.

Once the mechanism is designed, corresponding calculations are made to determine the safety factors and size of the tool, as well as dimensional and geometric tolerances. In addition, all parts are simulated in SolidWorks, in order to verify that the deformations are not excessive and the calculations are correct.

As a final point, the study is made for the manufacture of the tool by means of a conventional lathe, from the initial dimensions of the rolled blanks to the fully finished tool.

1.INTRODUCCIÓN

1.1.MOTIVACIÓN

Históricamente ha existido la permanente necesidad de mejorar la calidad de las piezas y las herramientas en el sector industrial, con el objetivo de optimizar su funcionamiento así como alargar su vida útil.

Uno de los mayores factores de riesgo es la fatiga. Debido a que en muchas ocasiones se tiene que trabajar con factores de seguridad muy ajustados (en el caso de herramientas de gran precisión o en equipos donde no pueda haber sobredimensionamientos por falta de espacio), hoy en día hay multitud de mecanismos que ven limitado su vida útil debido a la resistencia a fatiga de alguno de sus componentes. Debido a este problema, los equipos de ingeniería tienen que estar en constante reciclaje para aprender nuevos métodos de fabricación o nuevos tratamientos para los materiales.

Otro de los principales objetivos que se presentan en la industria es la optimización de las características superficiales, como podrían ser la dureza o la rugosidad superficial.

La importancia de la dureza recae en una mayor resistencia al desgaste y como consecuencia, una mayor vida a fatiga.

La rugosidad superficial tiene gran importancia en la industria debido a que los ajustes entre piezas están directamente relacionados con dicha cualidad, factor prioritario para un buen funcionamiento de las herramientas de alta precisión. En el sector alimentario y farmacéutico, donde se tiene un alto estándar de limpieza y calidad (los productos que se fabrican serán consumidos por seres humanos, y en el sector farmacéutico serán consumidos por seres humanos enfermos) el acabado superficial del interior de todos sus equipos tiene una gran relevancia, ya que la reflectividad evita que se alojen partículas contaminantes en las paredes, además de mejorar su facilidad de limpieza. Según UNE-EN ISO 22000, las superficies en contacto con alimentos deben tener una rugosidad media Ra igual o inferior a $0,8\text{ }\mu\text{m}$.

Actualmente existen distintos procesos orientados a mejorar la calidad superficial de las piezas tratadas, entre las cuales hay que hacer mención del bruñido con bola, proceso que se va a estudiar en este proyecto.

El bruñido es un proceso de mecanizado que tiene la particularidad de que no genera arranque de viruta del material, debido a que no se supera el límite de rotura de este. Consiste en presionar un rodillo o una esfera de gran dureza a lo largo de toda la superficie de una pieza, deformando plásticamente los picos y los valles de la superficie para conseguir “allanarla”, teniendo un control sobre la rugosidad y las dimensiones finales de dicha superficie.

En la figura 1 se puede apreciar una esquematización del proceso.

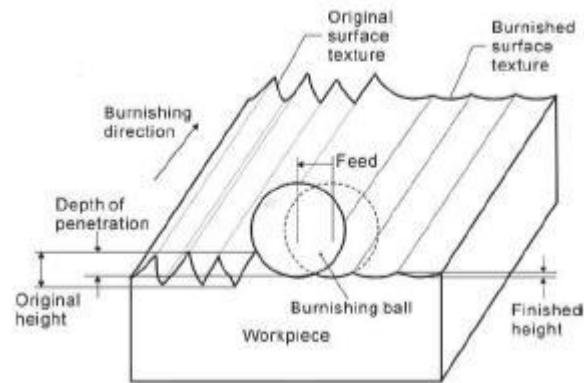


Fig. 1. Diagrama esquemático para el proceso de bruñido con bola. (Fang-Jung Shiou & Chien-hua Chen, 2003.)

El bruñido también mejora la resistencia a fatiga de las piezas, ya que el proceso de deformación plástica en frío introduce tensiones residuales compresivas en la pieza de trabajo. Este es un factor a tener en cuenta para alargar la vida útil de las piezas que se usan en la industria.

1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una herramienta capaz de llevar a cabo el proceso de bruñido con bola en el interior de cilindros de diferentes diámetros.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Seleccionar el material más adecuado para fabricar la herramienta teniendo en cuenta la maquinabilidad y el precio
- 2- Realizar los cálculos correspondientes para determinar los factores de seguridad y evitar sobredimensionamientos no intencionados.
- 3- Simular mediante SolidWorks las deformaciones para comprobar que el estudio de diseño se ha realizado correctamente.

- 4- Diseñar un sistema para poder aplicar distintas fuerzas de bruñido con el objetivo de poder bruñir cilindros de distintos materiales.
- 5- Realizar un prototipo dimensional utilizando la técnica de FDM.
- 6- Realizar un estudio de las piezas en bruto y posteriormente hojas de ruta para poder fabricar la herramienta mediante torno y fresa.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. RUGOSIDAD SUPERFICIAL

El acabado final y la textura de una superficie son de gran importancia e influencia para definir la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y apariencia externa de una pieza o material, por lo que la rugosidad es un factor importante a tener en cuenta. La forma más habitual de determinar dicha rugosidad es considerando el parámetro R_a (rugosidad media aritmética). Según la norma ISO 4288:1998, ésta se calcula mediante la suma de los valores de las áreas que quedan por encima y por debajo de una línea media del perfil, y dividiéndola posteriormente entre la longitud de muestreo.

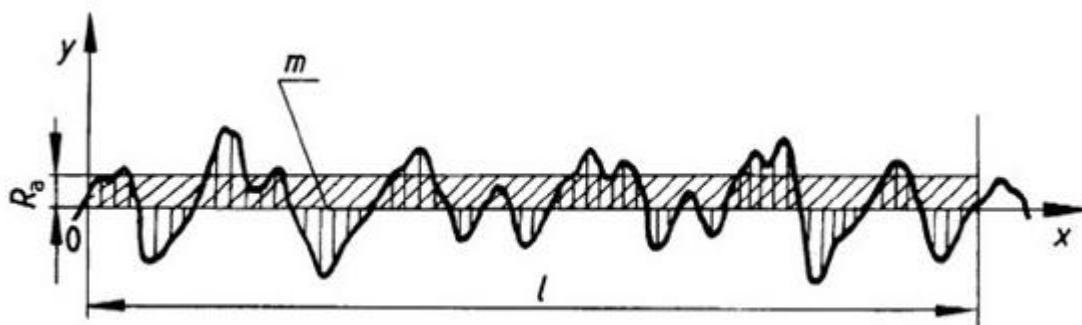


Fig.2. Perfil de rugosidad

Otro de los parámetros evaluados a la hora de determinar la rugosidad de las superficies es la R_t (rugosidad total del perfil en la longitud de evaluación), que representa la altura entre el pico más alto y el valle más profundo.

1.3.2. MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD

El rugosímetro es el aparato adecuado para medir la rugosidad superficial. En cada movimiento de avance se registra la altura del palpador. El palpador rastrea la superficie y convierte las

irregularidades en señales eléctricas. El desplazamiento vertical del palpador aproxima las dos láminas de un condensador, modificando su capacidad y con ella la señal eléctrica.

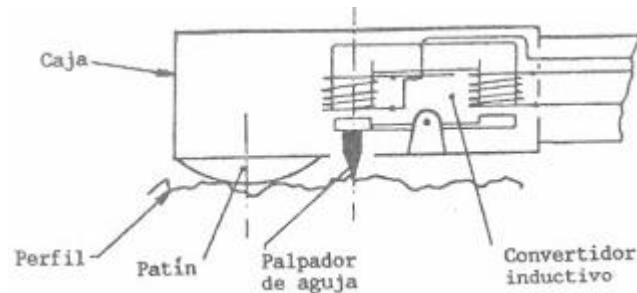


Fig. 3. Palpador

1.3.3. TÉCNICAS DE ACABADO SUPERFICIAL

Tal y como ya se ha comentado previamente, además del bruñido con bola hay otras técnicas para mejorar la calidad de las superficies. Es interesante nombrarlas debido a que dependiendo de la técnica que se use, se obtendrán valores distintos y condiciones diferenciales:

- Granallado: Consiste en propulsar un fluido a alta presión acompañado de un material abrasivo, para provocar un chorro que actúa sobre la superficie objeto. De esta manera se puede disminuir la rugosidad de la superficie, así como limpiarla de contaminantes. Inicialmente este proceso se realizaba con arena, pero con el paso de los años se ha substituido por diferentes materiales abrasivos.
- Lapeado: Consiste en frotar una piedra abrasiva de grano muy fino re una superficie, con lo que se consigue eliminar unas micras de material, mejorando la rugosidad de la superficie sin modificar su geometría.
- Pulido: Proceso por el cual se abrillanta una superficie mediante la acción de abrasivos montados en soportes blandos. De esta manera se consigue mejorar la rugosidad de las superficies mecanizadas.
- Electropulido: El metal a ser pulido actúa como ánodo en una celda electrolítica, disolviéndose. Con la aplicación de corriente, se forma un film polarizado en la superficie metálica bajo tratamiento, permitiendo a los iones metálicos difundir a través de dicho film.

En aleaciones, como el acero inoxidable, se tiene además la ventaja adicional que, al ser el hierro un metal que se disuelve fácilmente, se incrementa el contenido de cromo y níquel en la superficie, aumentando así la resistencia a la corrosión.

En cuanto a las técnicas de acabado superficial de interiores de superficies tubulares, el método en el que se centra el presente trabajo no ha sido estudiado en profundidad todavía. La mayoría de procesos de acabado para interiores de tubos se realizan mediante arranque de viruta. En el caso particular del mundo automovilístico, el bruñido se conoce más coloquialmente como el proceso de superacabado con arranque de viruta para interiores de cilindros, que consiste en elevar la precisión y calidad superficial además de mejorar las tolerancias geométricas (cilindricidad, planicidad, redondez,...) de los cilindros previamente rectificadas, mediante una herramienta fabricada con un material abrasivo. En la figura 4 se puede observar una herramienta de bruñido de interiores de cilindros mediante el proceso de arranque de viruta. Estas herramientas dejan unas marcas características en los cilindros en forma de espiral.



Fig. 4. Herramienta de bruñido de cilindros mediante arranque de viruta.

En cuanto al proceso de bruñido que se está tratando en este proyecto, las herramientas más utilizadas y comercializadas son las herramientas de bruñido mediante rodillos, que se colocan en el contrapunto del torno, completamente concéntricas al eje de rotación de este y se insertan en el interior de los cilindros. El problema de este tipo de herramientas es su versatilidad, ya que solo son útiles para bruñir el diámetro concreto, para el que están dimensionadas. En la siguiente figura se muestra una herramienta del catálogo de ECOROLL de bruñido con rodillos.

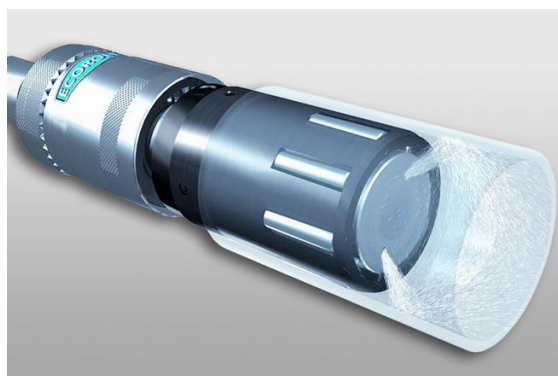


Fig. 5. Ejemplo de herramienta de bruñido de interiores mediante rodillos comercializada por ECOROLL

2. ESTADO DEL ARTE

Para llevar a cabo esta investigación, se ha realizado una revisión del trabajo desarrollado.

Se ha encontrado que hay diferentes investigadores que han trabajado en estos temas, que han obtenido resultados, como los que se muestran a continuación. Estos resultados han sido considerados como referencias importantes en este trabajo, para definir el punto de partida y los posibles resultados a obtener.

Algunos de los autores que han trabajado en esta línea son: ROETTGER, K., 2002; KLOCKE, F. & Liermann, J., 1998; LUCA, L., 2002; PREVEY, P.S., et al., 2003 y ADEL MAHMOOD HASSAN y AYMAN MOHAMMAD MAQABLEH, 2000; NEMAT, M. y LYONS, A.C., 2000; YEN, Y.C. & ALTAN, T., 2004.

PROCESO DE BRUÑIDO

El bruñido es un proceso tecnológico que consiste en deformar plásticamente las irregularidades (picos y valles del perfil de rugosidad) de una superficie por la acción de una fuerza controlada, que se transmite a través de un indentador en forma de cilindro o bola. La figura 5 muestra el efecto del proceso de bruñido con bola en una superficie con una rugosidad resultante de un mecanizado previo.

Es un proceso de acabado mucho más complejo que los mencionados en la sección anterior, debido principalmente al hecho de que su ejecución pone en juego procesos de deformación plástica difíciles de predecir y modelar. Además, la variedad de geometrías que permite tratar se reduce a superficies planas, cilíndricas o cónicas y otras topografías simples como cambios de bisels, partes traseras y radios, lo que la hace menos versátil que procesos como el chorreado. A pesar de estos inconvenientes, el proceso de bruñido tiene ventajas indudables sobre otros procesos, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Es un proceso de acabado sin eliminación de viruta, que permite mantener las dimensiones finales alcanzadas después del mecanizado.

- Es una operación que puede ser automatizada y ejecutada en la misma máquina donde se ha realizado el mecanizado previo, reduciendo el tiempo de procesamiento.
- Aumenta la dureza superficial de las piezas tratadas, mejorando su coeficiente de fricción y resistencia al desgaste en el contexto de un montaje dinámico.
- Induce tensiones residuales de compresión, que mejoran la vida de fatiga de la pieza tratada.

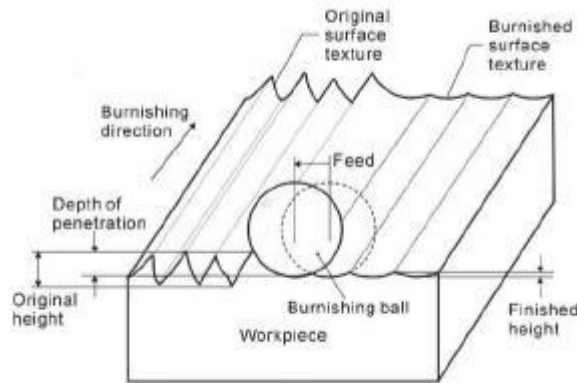


Fig. 6. Proceso de bruñido, según Sihou et al. (2003)

El término laminación profunda se utiliza para referirse a cualquier bruñido, bola o rodillo, utilizando fuerzas de alta magnitud para inducir altas tensiones residuales de compresión.

ESTRÉS RESIDUAL

La tensión residual es la tensión que absorbe la pieza durante su fabricación, tensión que puede liberarse con el paso del tiempo, con resultados beneficiosos o perjudiciales para el desempeño de la función a la que está destinado.

Las tensiones residuales son tensiones que permanecen dentro del material cuando no están sometidas a cargas externas. Su origen se encuentra en los tratamientos mecánicos y térmicos utilizados en los procesos de fabricación o en las cargas aplicadas cuando la pieza o componente está en servicio. Tales tensiones pueden causar cambios dimensionales y distorsiones en las piezas fabricadas que las hacen inútiles para la aplicación.

El problema principal es que, a diferencia de las tensiones externas aplicadas, las tensiones residuales son tensiones que son difíciles de medir, lo que los ingenieros a menudo ignoran en el diseño.

MEJORA DEL ACABADO A TRAVES DEL BRUÑIDO CON BOLA

En el documento, "Mejora en la resistencia al desgaste de componentes de latón por el proceso de bruñido de bolas" desarrollado por Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, 1999; Se considera el bruñido como un proceso de trabajo en frío, que se puede utilizar para mejorar las características de la superficie. Según estos autores, la mayoría de las obras que se han publicado antes, se refieren a los efectos del proceso de bruñido sobre la rugosidad superficial y la dureza, pero de acuerdo con Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, poco se ha hecho para demostrar esto, y este trabajo se dedicó a evaluar el aumento de la resistencia al desgaste resultante de una operación de bruñido en una sola pieza.

Se concluyó que la fuerza de pulido es el principal factor que afecta la resistencia al desgaste de la capa superficial de las piezas tratadas y que no existe una fuerza de pulido óptima con la que se obtienen los mejores resultados.

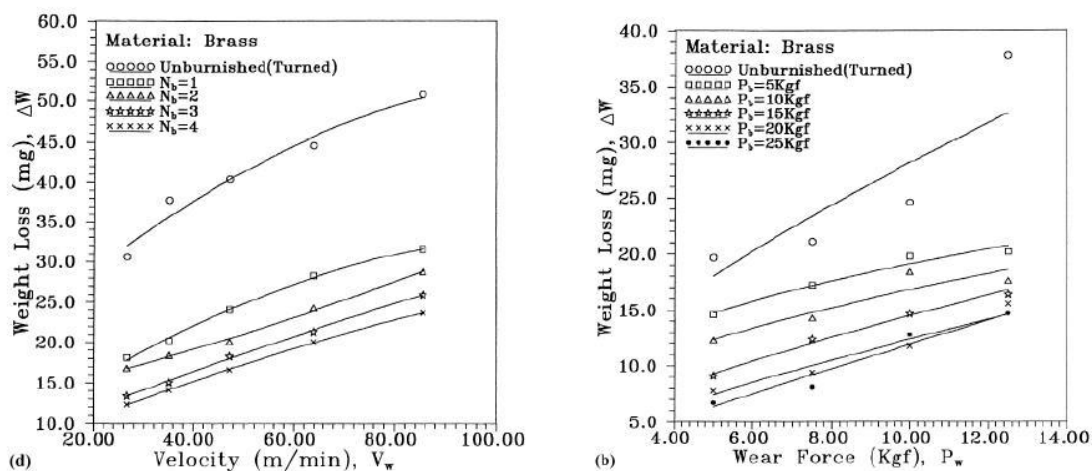


Fig. 7. Influencia de la velocidad de rotación y de la fuerza de contacto sobre la resistencia al desgaste de la pieza pulida.

(Adel Mahmood Hassan y Sulieman Z.S. Al-Dhi, 1999)

En la imagen de arriba pueden verse los resultados que obtuvieron. Evaluaron la pérdida de peso en función de la velocidad y la fuerza de contacto en el ensayo de evaluación de resistencia al desgaste de la parte pulida.

(Yen, YC & ALTAN, T., 2005), también concluyó en su trabajo "Modelado de Elementos Finitos del Proceso de Bruñido de Rodillos", que el bruñido de bolas es un proceso efectivo para mejorar la calidad superficial, donde una bola cerámica transforma una superficie mecanizada bajo una alta presión, aplanando los picos de la rugosidad. Este proceso no sólo mejora el acabado superficial, sino que imprime también tensiones residuales de compresión favorables y aumenta la dureza en las superficies funcionales, lo que puede conducir a un aumento de la vida cuando hay fatiga. A esta conclusión han llegado otros investigadores, pero es interesante observar que el proceso no sólo mejora la rugosidad de la superficie, sino que también tiene otro valor añadido muy importante: contribuye a aumentar la vida útil de la fatiga del material.

En su estudio (Yen, Y. C. y Altan, T., 2005), estos investigadores desarrollaron los modelos 2D y 3D utilizando el método de elementos finitos (MEF) para el bruñido de bolas. En el modelo, evaluaron la deformación superficial y las tensiones residuales y compararon estos parámetros, para superficies producidas por superficies torneadas y pulidas. Las tensiones residuales esperadas fueron validadas con los datos experimentales obtenidos de la literatura.

Más recientemente, H. Hamadache et al. (2006), en su estudio "Características de la capa superficial de acero Rb40 bajo rozamiento de bolas y rodillos", demuestran que el aumento de dureza disminuye con un aumento en la frecuencia de rotación y el avance del bruñido, mientras que la fuerza bruñidora junto con el número de golpes aumentan la dureza.

Como última referencia encontrada recientemente (Ainhoa Celaya et al, 2009), se presenta una obra en la que se considera de gran interés el desarrollo de un modelo de bruñido, para obtener los resultados deseados en términos de acabados superficiales y tensiones residuales en las piezas. Con este modelo, se debe evaluar el efecto de los diferentes parámetros que actúan en el proceso. En este caso, se estudia un proceso de bruñido de una pieza realizada en un torno, pero teniendo en cuenta el plano paralelo al eje del cilindro.

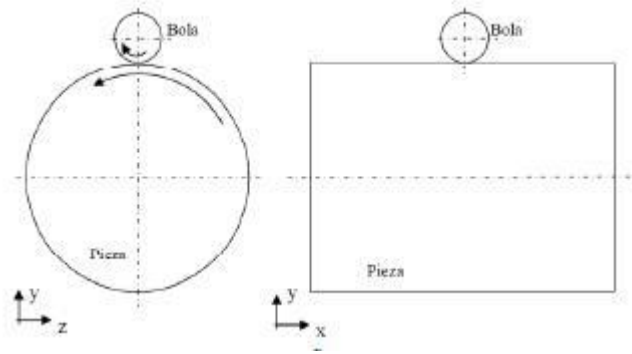


Fig.8. Esquema utilizado por Ainhoa Celaya y otros, Para desarrollar un modelo del proceso de bruñido con bola

El bruñido es un proceso tridimensional, sin embargo, concluyen que el uso de modelos MEF tridimensionales es limitado debido al alto tiempo requerido en las simulaciones. Por lo tanto, presentan un modelo de elementos finitos 2D del proceso de pulido de bolas. Mediante este modelo se estudia el efecto de los diferentes parámetros del proceso (avance, presión de bruñido, etc.) sobre las tensiones residuales y la rugosidad final obtenida en la pieza de trabajo.

En la fase investigativa más reciente, las obras consultadas tratan con el mismo grado de importancia la búsqueda de resultados óptimos para la rugosidad superficial, la microdureza y las tensiones residuales. M.M. El-Khabeery y M.H. El-Axir, en su trabajo de 2011 [42], analiza las variaciones obtenidas después del bruñido, en estas tres propiedades mecánicas de aluminio A6061-T6, controlando los siguientes parámetros del proceso: velocidad de bruñido, profundidad de penetración y número de pasadas. Los gráficos de la figura 4 muestran algunos de los resultados obtenidos.

Los valores experimentales que se tabulan en el artículo se utilizan para derivar los correspondientes modelos matemáticos, los cuales evalúan por separado los efectos consecuentes sobre la rugosidad, la dureza HV y las tensiones residuales.

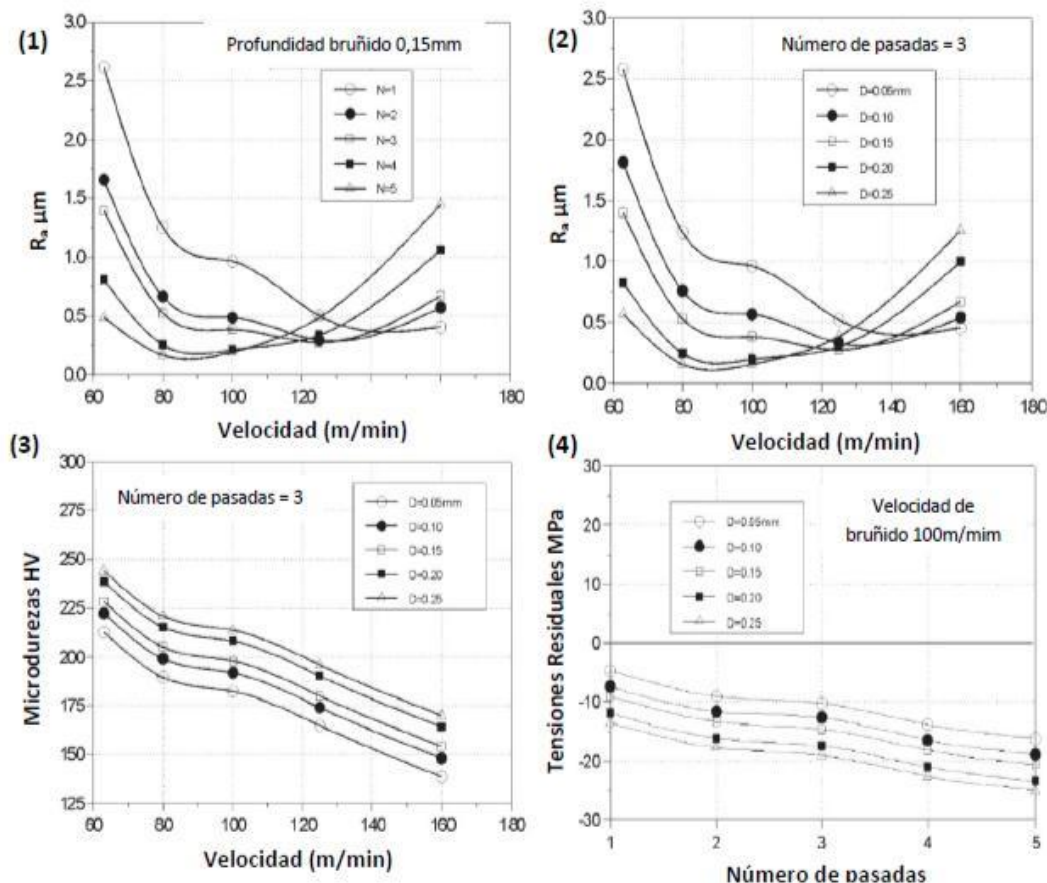


Fig. 9. Gráficos comparativos de los resultados obtenidos por M.M. El-Khabeery y M.H. El-Axir (2011). (1) Valores R_a en función de la velocidad de bruñido, para una profundidad de penetración de 0,15 mm. (2) Valores de R_a en función de la velocidad de bruñido para 3 pasadas. (3) Valores de microdureza para distintas velocidades de combustión en 3 pasadas. (4) Valores de tensión residual en función del número de golpes, para una velocidad de bruñido de 100 m / min

A partir de sus resultados han podido concluir que a velocidades de bruñido bajas y profundidades de penetración elevadas, las superficies resultantes son mucho más lisas, mientras que una combinación de alta velocidad y profundidades de penetración altas dan como resultado un acabado superficial empeorado. El número óptimo de pases propuestos por estos autores para maximizar R_a es de 3 o 4 pasadas. Las altas velocidades de bruñido también tienen una influencia negativa sobre las tensiones de compresión residual máximas, mientras que las mayores profundidades de penetración y el número de pasadas les favorecen.

También en 2011, A. Rodríguez et al. presenta un trabajo titulado "Mejora de la superficie de los ejes mediante la técnica del bruñido profundo", en el que se realiza una comparación del comportamiento de varios parámetros relevantes (intensidad, velocidad, etc.). Y es la influencia sobre la dureza, la rugosidad y las tensiones residuales, verificando las diferencias encontradas

después del torneado y pulido. El comportamiento de estos tres grupos de resultados ha sido considerado una referencia a tener en cuenta, al evaluar los resultados obtenidos por este estudio.

Después de los ensayos realizados, tanto los valores de rugosidad como de dureza, así como los esfuerzos de tracción residuales, muestran el bruñido de bolas como un proceso claramente ventajoso con respecto a otros procesos de acabado.

Moldeador con bola de aleación de titanio

Prevéy et al. Representó la mayor profundidad y magnitud de las tensiones residuales inducidas por la sujeción de Ti-6Al-4V especímenes bruñido, en comparación con aquellos sometidos a granallado.

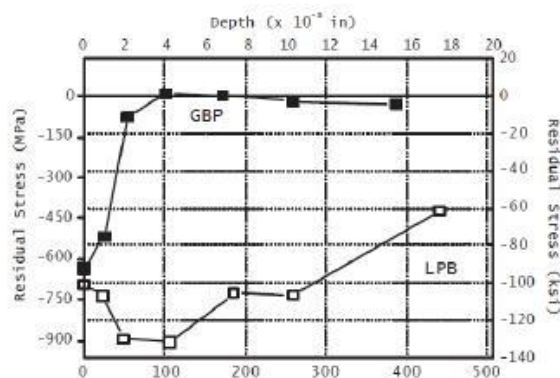


Fig. 10. Comparación de tensiones residuales en probetas deformadas con Ti-6Al-4V sometidos a pulido de bolas (LPD) y granallado (GBP), según Prevéy (2002).

PROCESOS DE BRUÑIDO CON BOLA ASISTIDA POR VIBRACIÓN

La primera herramienta de bruñido asistida por vibración fue diseñada por Gómez-Gras et al. En 2014. Las vibraciones que ayudan al proceso son transmitidas por una bobina excitada y acoplada a la bola bruñidora a través de dos placas flexibles. La frecuencia de funcionamiento a la que opera esta herramienta es de alrededor de 2,4 kHz. Con el fin de comparar los efectos causados por este proceso, comparamos los resultados obtenidos con el proceso convencional o sin ayuda en muestras de aluminio AISI 1038 y AISI 7078. La caracterización consistió en analizar la rugosidad de la superficie y estudiar el perfil de microdureza y tensiones de compresión residual de la pieza después del bruñido.

Para las probetas de aluminio AISI 7078, se observó una mejora sustancial de la rugosidad media final al introducir vibraciones en el proceso. De hecho, se detectó que con un paso del proceso asistido se obtienen resultados similares que con cinco del proceso convencional. Sin embargo, a nivel de tensiones residuales y microdureza, la mejora es también fiable, aunque los resultados no son particularmente altos. Los autores atribuyen este hecho a una posible insuficiencia de la frecuencia de vibración, que no alcanza un umbral mínimo para interactuar con la plasticidad acústica del material, y liberar completamente sus dislocaciones para desplazarlas. Este mismo comportamiento se detectó en el acero, siendo más notable la falta de efectos considerables de la introducción de la vibración en la acumulación de tensiones residuales de compresión.

INFLUENCIA DEL PROCESO DE PROCESAMIENTO DE BOLAS SOBRE LA DUREZA Y EL ESTRÉS RESIDUAL DE ALUMINIO A92017 SUPERFICIE CONVEX

En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas realizadas con este proceso aplicado a las piezas convexas de aluminio A92017, de Antonio Travieso, Giovanni Gómez, Amelia Nápoles, Antonio Sánchez y Hernán González. Como resultados, se presentan las medidas de dureza y estrés residual obtenidas antes y después del bruñido. También se extraen conclusiones sobre la mejora de estas propiedades en las superficies pulidas.

El proceso de esmerilado de bolas se realiza para mejorar el acabado de piezas que se ha mecanizado previamente y para obtener una superficie más dura con tensiones residuales de compresión. Así se obtiene una mayor resistencia al desgaste ya la fatiga.

Con la operación de bruñido, se pueden obtener buenos acabados superficiales en superficies de forma compleja. Además de mejorar la calidad de la superficie, aumenta la dureza de la superficie, cambia el mapa de estrés residual que permanece en las capas superficiales de la pieza, lo que puede ser interesante para mejorar la vida del material de fatiga.

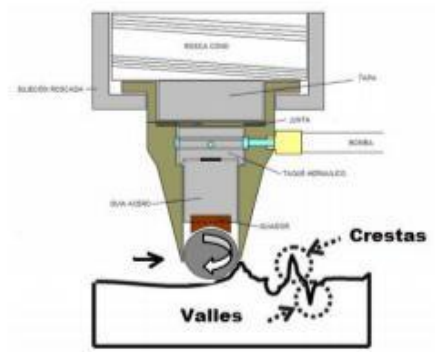


Fig. 11. Representación esquemática del proceso de bruñido con bola

Para medir las tensiones residuales, se utilizó una técnica de difracción de rayos X. Este es el método más aceptado para la medición no destructiva de tensiones residuales en materiales cristalinos. Con esta técnica se mide la deformación de la red cristalina y se determina el voltaje a partir de las constantes elásticas de difracción.

De la ley de Bragg se miden las distancias entre los planos de las redes cristalinas y se encuentra una relación entre la distancia entre los planos de difracción (d) y el seno del ángulo de inclinación de los diferentes cristales ϕ . En las siguientes fotografías, estos gráficos se pueden observar, para ambos especímenes. Los puntos triangulares representan los valores para los ángulos positivos ϕ y los puntos cuadrados para los ángulos negativos. La línea representa la tendencia estimada para estos valores. Para un valor de $\phi = 0^\circ$, el valor de las tensiones residuales se determina por el método del centro de gravedad. Este cálculo es posible ya que las tensiones son proporcionales a las deformaciones en la forma de la ecuación.

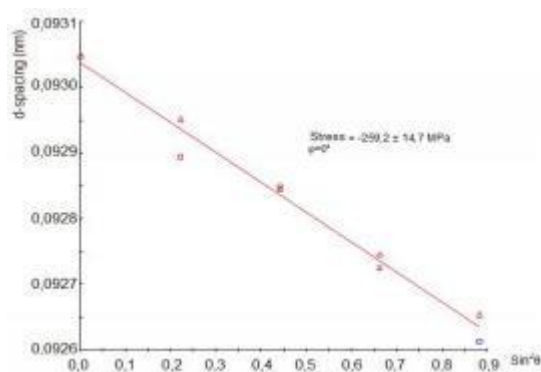


Fig. 12. Variación de las distancias entre planos, en función del seno del ángulo y del valor obtenido de las tensiones residuales, para la probeta 1 (radio 100 mm)

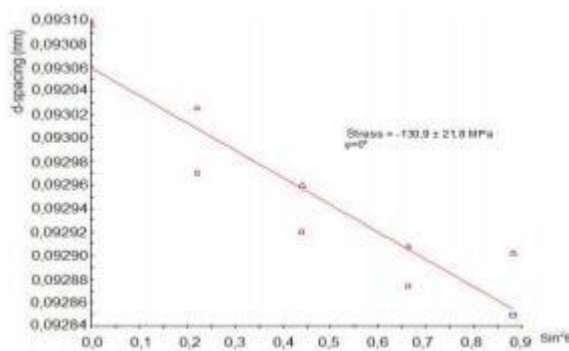


Fig. 13. Variación de las distancias entre planos, en función del seno del ángulo y del valor obtenido de las tensiones residuales, para la probeta2 (radio 50 mm)

Como puede verse en los gráficos anteriores, los valores obtenidos son de -259,2MPa y -130,9MPa, respectivamente. El signo negativo representa que estas tensiones son de tipo compresivo. Este comportamiento se produce en ambos especímenes, independientemente de su radio de curvatura. En ambas superficies coinciden los valores de los parámetros utilizados en el proceso. La única diferencia entre las superficies pulidas es su radio de curvatura.

Por lo tanto, fueron capaces de sacar conclusiones de este estudio, que son los siguientes:

1. Aumenta los valores de microdureza del orden del 17% en superficies de aluminio convexo A96351.
2. Proporciona tensiones residuales de compresión, lo que probablemente aumentará la vida de fatiga de las piezas.
3. En general, existe un cierto grado de consistencia entre el aumento de los valores de micro-dureza y la aparición de tensiones residuales de compresión.

Al resumir toda la literatura científica consultada en este epígrafe, podrían hacerse las siguientes generalizaciones:

1. Después del bruñido, los esfuerzos de compresión residual aumentan su valor, que ha sido evaluado como positivo por muchos autores, debido a la contribución que este resultado da al aumento de la vida de fatiga de las piezas bruñidas.

2. La rugosidad de la superficie, que es el parámetro más ampliamente estudiado, mejora significativamente después de un proceso de bruñido de bolas o rodillos.
3. En la mayor parte de los trabajos se recogen una gran cantidad de resultados experimentales para validar los parámetros implicados en el proceso, los cuales se corroboran con aproximaciones simplificadas del comportamiento teórico del bruñido, dada la complejidad del estudio de este tridimensional proceso de deformación plástica.
4. De todos los tratamientos de superficie a los que se hace referencia, el bruñido tiene claras ventajas sobre otros procesos, tales como el granallado o electropulido.
5. La mayoría de los autores, especialmente en los estudios más recientes, aseguran una mejora en la dureza superficial resultante del proceso de bruñido.
6. Existe un consenso bastante general en cuanto a los parámetros en los que el proceso de bruñido es dependiente. Entre las más importantes están la fuerza de bruñido, la velocidad de avance, la profundidad de paso y el ancho de paso lateral.

Seguidamente se muestra una recopilación de artículos referentes al bruñido en los que se han realizado distintos ensayos y de donde se ha resumido la información principal para facilitar el estudio de dicho proceso de mecanizado, con el objetivo de tener un punto de partida para futuros experimentos o diseños.

EFFECTO DEL MATERIAL-HERRAMIENTA EN EL PROCESO DE BRUÑIDO

Morimoto, T. and Tamamura, K.

Introducción

Parte de la base de que una superficie cilíndrica de una barra de acero templado puede ser bruñida usando un nuevo diseño de la herramienta. La bola como herramienta era comercialmente carbono-cementado en un estudio previo.

Dicho experimento se realizó con cinco tipos de bolas distintas, usadas como herramienta para examinar el efecto de material-herramienta en el proceso de bruñido.

Método experimental

En este experimento se usó una barra cilíndrica de acero, que fue bruñida mediante una herramienta de bruñido con bola y con una velocidad en el torno de 100 m/min. Los rangos de rugosidad obtenidos fueron desde 0,42 a 1,96 micras Ra entre todas las piezas.

Las esferas usadas en el proceso de bruñido tenían un diámetro de 4,762 mm y estaban fabricadas de:

- 1- Esfera de alto contenido en carbono (JIS-SUJ2; dureza HV = 916, rugosidad superficial Ra = 5 nm).
- 2- Carbono cementado (JIS-G2; HV = 1766, Ra = 3 nm).
- 3- Nitruro de silicio (HV = 1876, Ra = 4 nm).
- 4- Alúmina (HV = 1550, Ra = 78 nm).
- 5- Carburo de silicio (HV = 2200, Ra = 176 nm).

Todos ellos son comercialmente disponibles.

También se usaron diferentes tipos de lubricantes: VG, VS y VP, fueron aplicados individualmente para ayudar al proceso de allanado por bruñido.

1. VG con aceite mineral (JIS-VG10) de baja viscosidad ($10 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 313 K) como aceite base.
2. VS aceite mineral conteniendo un 4% S (añadido como ditertiary-nonyl-polysulphide)
3. VP aceite mineral conteniendo un 4 % P (añadido como tricresylphosphate), respectivamente.

Material-herramienta y rugosidad superficial

La figura 1 muestra la rugosidad superficial de las piezas sometidas a bruñido usando cada una la bola-herramienta con el lubricante VS. Las marcas con una marca de flecha en la figura 13 representan el resultado obtenido cuando se ha usado solo una pieza, como se mencionó anteriormente.

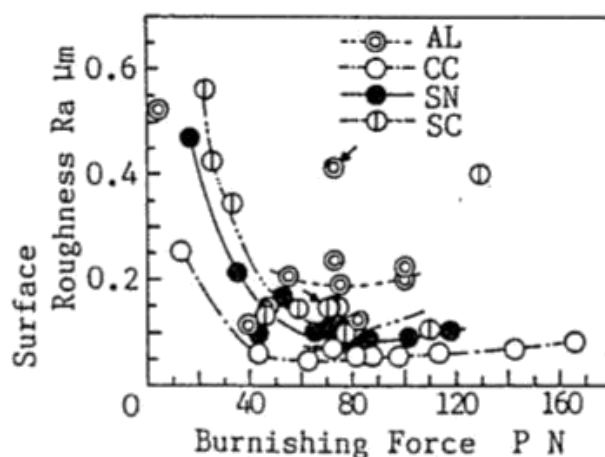


Fig.14. Rugosidad superficial de la pieza bruñida con cada bola-herramienta. AL-Alúmina, CC-Carbono Cementado, SN-Nitruro de Silicio, SC-Carburo de Silicio. Pieza JIS-S38C, lubricante VS, velocidad de bruñido 100 m/min.

La esfera de carbono cementado produce la superficie más lisa con una fuerza en el bruñido desde los 40 a 100 N. La bola-herramienta de nitruro de silicio también dio buenos resultados. Sin embargo, el rango de fuerza conveniente para el acabado de alisado fue más amplia para el carburo cementado que para la bola-herramienta de nitruro de silicio. El carburo de silicio y la alúmina no resultaron tener un acabado tan satisfactorio.

Cuando el nitruro de silicio, carburo de silicio, y la alúmina fueron usadas en las bolas-herramienta, a veces pequeños picos y valles aparecieron en la superficie bruñida en el mismo sentido de la velocidad de avance de la bola-herramienta. Un gran número de grietas o ralladuras pueden haber sido como tal como muestra la superficie de la figura 14 (a). Estas grietas probablemente fueron producidas por un contacto de deslizamiento que fue inducido por una rotación incompleta de la bola-herramienta.

En general, la superficie bruñida tenía un brillo metálico incluso si no fue muy alisada. Sin embargo, el carburo de silicio y la alúmina en las bolas-herramienta a menudo producían una superficie mate como se muestra en la figura 14 (b). La superficie mate es más probable que se formara por una huella de la superficie de la bola-herramienta bajo casi completo contacto de rodillo porque las dos geometrías de la superficie se parecen y la rugosidad de las dos superficies son casi iguales: por ejemplo, la rugosidad de la superficie mate y la superficie de la bola-herramienta (carburo de silicio) son 0,138 y 0,176 (antes de usada) o 0,278 (después de usada) micras Ra.

Cuando la bola-herramienta mantiene la rotación de alisado, la rugosidad del bruñido depende de la rugosidad de la superficie de la bola-herramienta. Sin embargo, la rotación de alisado de la bola-herramienta está profundamente perturbada por la superficie dañada de la bola-

herramienta, y la adhesión y el punto de contacto entre la bola-herramienta y la pieza durante el bruñido. Tales superficies dañadas y adhesiones dependen del material-herramienta.

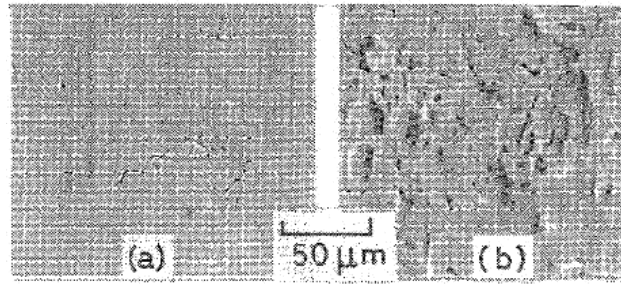


Fig. 15. Micrografía escaneada electrónicamente de una pieza bruñida con bola-herramienta de (a) nitruro de silicio y (b) carburo de silicio.

Efecto del lubricante en el proceso de bruñido.

La adición del lubricante VS, VG y VP fueron usados para elucidar el efecto del lubricante en el proceso de bruñido con cada bola-herramienta. La fuerza del bruñido fue seleccionada sobre los 70 N en base de los resultados mostrados en la figura 13. La alimentación de la bola-herramienta fue de $4,38 \times 10^{-2}$ mm/rev.

El efecto del lubricante en la rugosidad superficial es notablemente diferente según el tipo de material-herramienta como se muestra en la figura 15 y está clasificada en tres modelos. (1) Para la bola-herramienta de carburo cementado, considerada una rugosidad superficial fina (menos de $0,1 \mu\text{m Ra}$) fue producida independientemente de los lubricantes. En vista de cada lubricante, sin embargo, el mejor acabado superficial fue obtenido cuando se usó el lubricante VP. La cantidad de dispersión de la rugosidad superficial de la pieza bruñida usando el lubricante VP fue muy pequeña. Contrariamente, (2) las bolas-herramienta de alúmina y carburo de silicio no dieron una superficie alisada empleando cualquier lubricante. (3) Para las bolas-herramienta de nitruro de silicio y acero, el lubricante tuvo una gran influencia sobre la rugosidad de la superficie bruñida. El lubricante VP sobresale permitiendo la producción de una superficie alisada. La dispersión de la rugosidad superficial aumenta más por el uso de lubricante VS que por el lubricante VG.

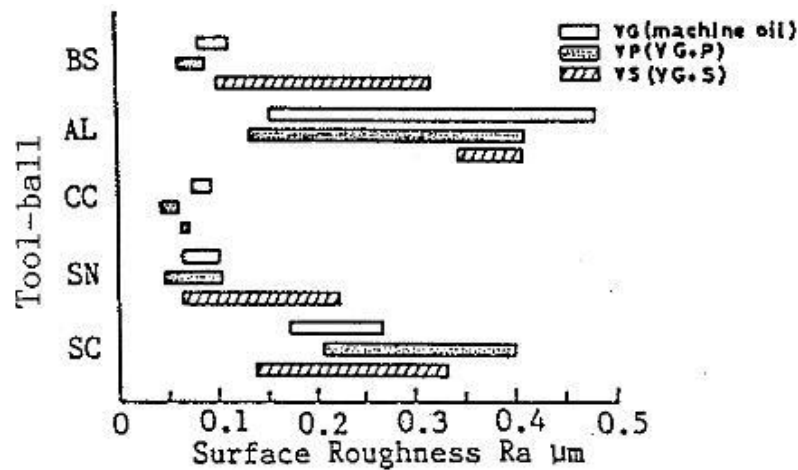


Fig. 16. Efecto del lubricante y material-herramienta en la rugosidad superficial. Pieza JIS-S38C, fuerza de bruñido 70 N, velocidad de bruñido 100 m/min. Características excepto BS (acero alto contenido en carbono) relacionado con el acero son iguales como en la Fig.1.

Conclusión

Pueden ser sacadas las siguientes conclusiones.

- (1) La bola-herramienta de carburo cementado produce la superficie más lisa.
- (2) La bola-herramienta de nitruro de silicio es ligeramente inferior a la de carburo cementado en el proceso de bruñido.
- (3) El efecto del lubricante en el proceso de bruñido depende del material-herramienta.
- (4) Es esperado que el fosfato tiene un efecto excepcional sobre el proceso de bruñido como también una presión extrema añadida.

MEJORAS EN LA CALIDAD SUPERFICIAL Y MICRODUREZAS DE SUPERFICIES INTERIORES MEDIANTE EL PROCESO DE BRUÑIDO

M.H. El-Axir, O.M. Othman and A.M. Abodiena.

Mejora en el interior de piezas tubulares mediante bola de cromo carbono de 8 mm de diámetro, Ra = 15 micras, HRC 62.

Torno CNC modelo Biglia B56/1 CNC.

400 rpm, 0,2 mm/rpm, profundidad de 0,5 mm.

Pieza de trabajo: Aluminio 2014 (utilizado por su importancia en la industria)

Modelos matemáticos para predecir resultados.

Parámetros: velocidad de rotación, avance, profundidad y número de pasadas.

Desde una Ra inicial de 4 micras hasta 0,14 micras.

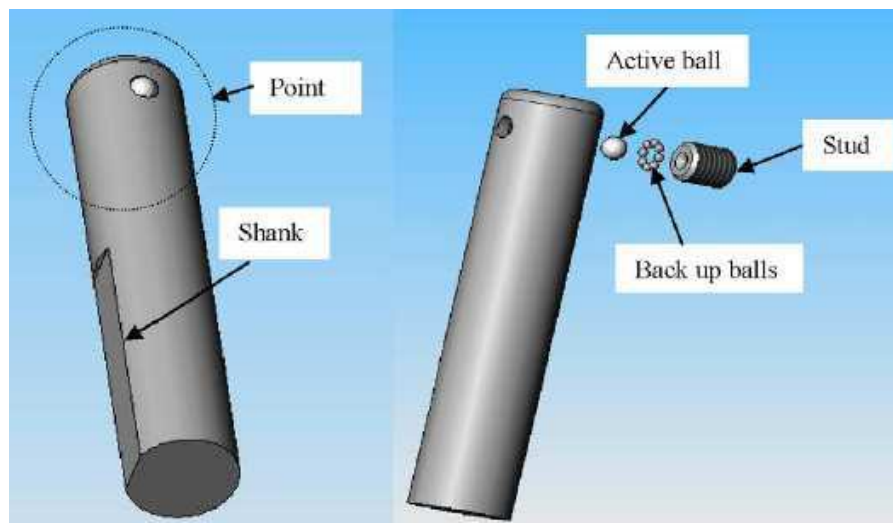


Fig.17. Herramienta de bruñido para interior de cilindros.

ACABADO SUPERFICIAL DE PRESIÓN USANDO UN METODO INNOVADOR DE BRUÑIDO CON BOLA CON EXCITADOR DE VIBRACIONES

Fang-Jung Shiou and Chuang-Hsiung Chuang.

Mejora de la rugosidad superficial mediante CNC con sensor en la herramienta para monitorizar en ordenador.

Estudio realizado sobre una pieza de acero (HRC 33) con varias inclinaciones, 30°, 45° y 60° y otra curvada.

Lubricante agua-aceite (1:50).

Material de la bola Carburo de Tungsteno (WC).

Fuerza normal de 470 N.

Velocidad de avance 800 mm/min.

Mejora de Ra desde 2,5 a 0,07 micras.

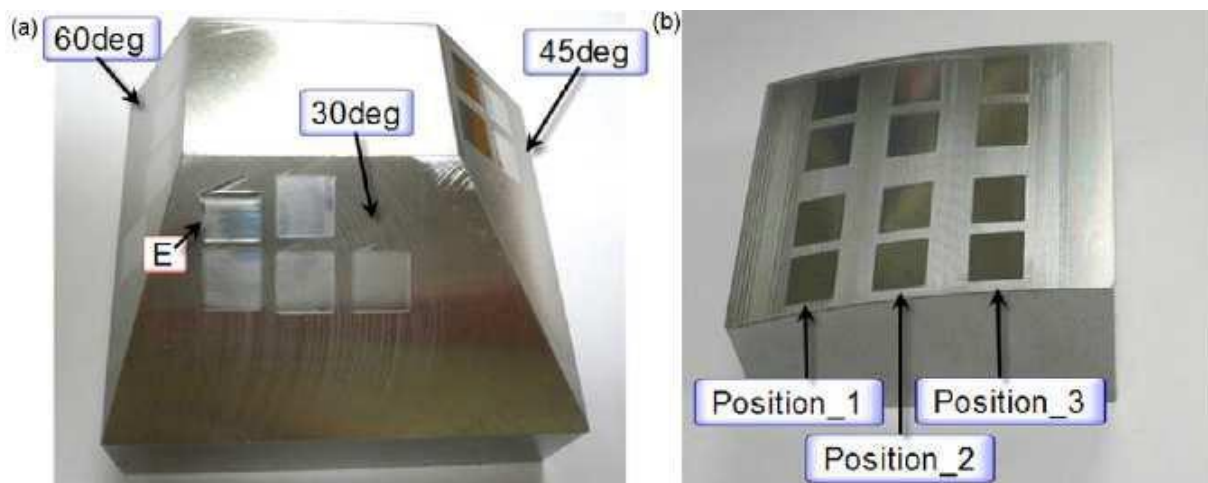


Fig. 18. Fotos de piezas bruñidas: (a) superficie inclinada y (b) con curvatura.

3.DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

3.1. PROPUESTAS DE DISEÑO

Las soluciones de diseño comentadas en el capítulo anterior han sido adoptadas después de mejorar los primeros diseños, por lo tanto, en un primer momento cuando se hizo la primera propuesta, no se contemplaron todas las soluciones.

A continuación se presentan las propuestas de diseño que se han ido descartando o mejorando, hasta llegar a la solución final que se ha adoptado para este proyecto.

3.1.1. PRIMERA PROPUESTA DE DISEÑO

Esta herramienta está pensada para colocarse en el contrapunto de un torno convencional, y que el bruñido se haga con la herramienta estática, moviéndose únicamente en el eje X del torno, mientras que el cilindro a bruñir rota, fijado al plato de tres garras del torno. En la figura 19 se puede ver un dibujo de la posición de la primera propuesta de diseño.

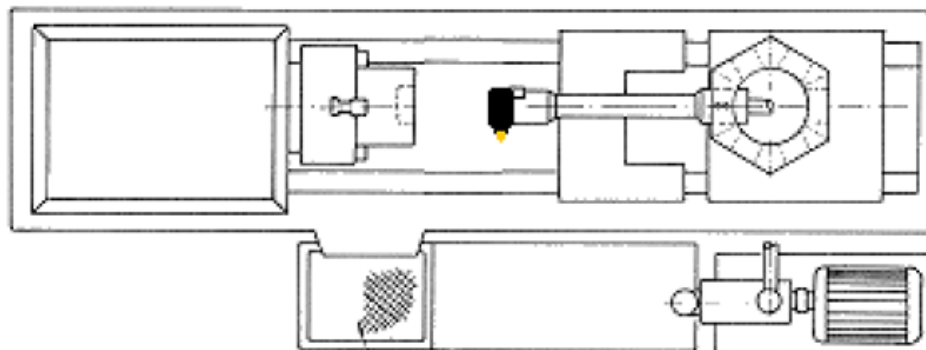


Fig. 19. Localización de la herramienta en el torno.

La herramienta consta de dos partes esenciales, un cuerpo superior que se fijará al cono del torno y además alojará en su interior distintas piezas de todo el conjunto. La segunda parte es el cuerpo inferior, que va roscado al cuerpo superior y además de alojar el resto de las piezas del mecanismo interno de la herramienta, tiene movimiento relativo respecto al cuerpo superior ya que por medio del movimiento de roscado entre ambos cuerpos se podrá dar un movimiento lineal en el interior que permitirá darle al muelle la precarga inicial.

Precargar el muelle mediante el roscado de dos cuerpos es el sistema más sencillo que se ha encontrado y cumple con su función correctamente: Dependiendo del roscado que tenga se puede

saber a cuántos milímetros equivale cada vuelta roscada, y sabiendo las características del muelle, se puede conocer la fuerza que éste está ejerciendo. A continuación se muestran dos capturas de pantalla de la herramienta diseñada en SolidWorks. En la figura 20 se puede ver una imagen de la herramienta acabada y se muestran el cuerpo superior y el inferior, mientras que en la figura 21 se puede observar mediante líneas discontinuas el mecanismo que hay en el interior.

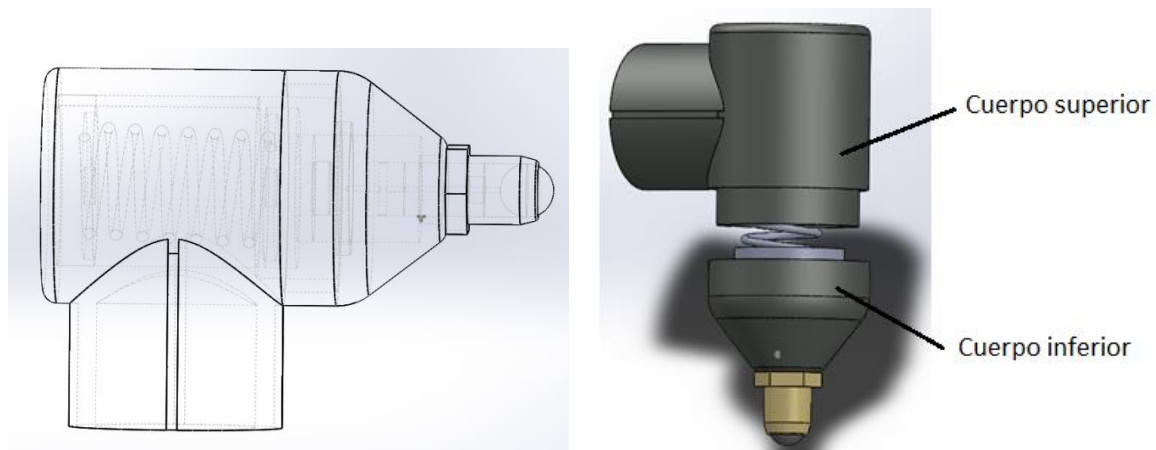


Fig. 20 y 21. Fotografías de la primera propuesta de diseño de la herramienta de bruñido de interiores.

A continuación se muestra una tabla donde se han sintetizado los puntos fuertes y puntos débiles de la herramienta a modo de resumen.

Tabla 1. Puntos fuertes y puntos débiles de la primera propuesta de diseño.

| Puntos fuertes | Puntos débiles |
|--|---|
| Puede controlarse la fuerza de bruñido que ejercerá la esfera sobre la superficie de la pieza. | Sólo puede bruñir piezas de su mismo diámetro. |
| Cabezal roscado para una fácil manipulación de la esfera, que se desgasta y periódicamente necesita cambiarse. | La longitud de bruñido es limitada. El mecanismo convierte el diseño de la herramienta en poco compacto. |

Después de hacer el análisis de los puntos fuertes y los puntos débiles de la primera propuesta se ha decidido desechar el diseño debido a las dimensiones finales y la falta de versatilidad de la herramienta. Los puntos fuertes se tomarán en cuenta como aprendizaje para el siguiente diseño. Para la segunda propuesta de diseño se tendrán en consideración los siguientes requisitos:

- Tiene que servir para bruñir tubos de distintos tamaños.
- Tiene que poder bruñir tubos estrechos y a una profundidad de mínimo 10 centímetros.

3.1.2. SEGUNDA PROPUESTA DE DISEÑO

Debido a las limitaciones de diseño de la primera herramienta, se decidió hacer un cambio conceptual del mecanismo en vez de modificar y mejorar dicha herramienta.

Con respecto a la primera propuesta de diseño, se decidió mantener sus puntos fuertes y centrarse en modificar la herramienta para mejorar sus puntos débiles:

- Se ha separado el cabezal del resto de la herramienta, estando el muelle y el resto del mecanismo fuera del cilindro mientras la esfera está bruñendo. De esta manera se ha conseguido reducir el diámetro de la herramienta al mínimo.
- Se ha cambiado la sujeción de la herramienta. En este caso, la herramienta se agarra al carro portaherramientas, permitiendo un grado de libertad adicional y pudiendo mover el cabezal en la dirección radial al tubo, ajustándose a su diámetro interior.

La figura 22 muestra el mecanismo de la nueva idea conceptual de la herramienta a diseñar.

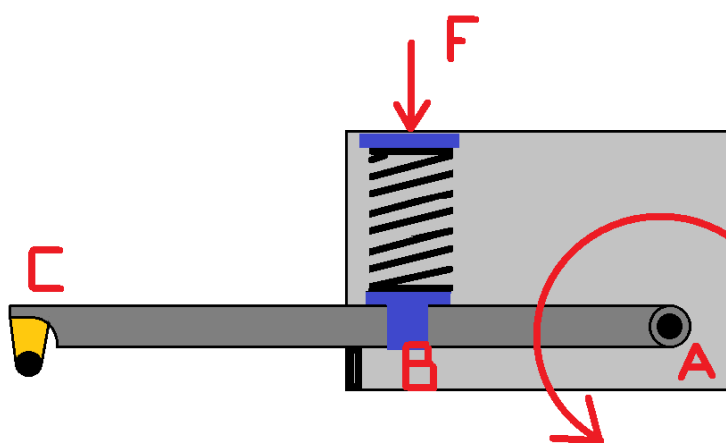


Fig. 22. Mecanismo de la segunda propuesta de diseño.

El brazo de la herramienta (C-B-A) bascula respecto del punto A. El brazo se sujeta en el punto A, introduciéndose en un pasador roscado que tendrá una tuerca en el extremo, y mediante un cojinete se permite el movimiento de rotación del mismo.

En el punto B hay un muelle precargado que ejercerá una fuerza controlada al brazo, generando un momento de rotación anti-horario sobre el punto A. De esta manera, el brazo quedará firmemente apoyado contra el tope de la herramienta, empujado por la fuerza del muelle.

En el punto C se encuentra la esfera que permitirá realizar el bruñido. Mediante lubricación se consigue una rotación fluida de la esfera sobre su casquillo. La fuerza que ejercerá la bola sobre la cara interna del cilindro viene dada por el muelle que ejerce una fuerza sobre el brazo.

Por lo tanto, según la ecuación 1, que corresponde al sumatorio de momentos en una pieza estática:

$$(1) \quad \sum M_a = 0$$

$$F_C \cdot d_{C,A} = F_B \cdot d_{B,A}$$

Así podemos saber la precarga que hay que aplicarle al muelle para poder bruñir cada material.

La tabla 2 nos muestra la síntesis de los puntos fuertes y los puntos débiles de la segunda propuesta de diseño.

Tabla 2. Puntos fuertes y puntos débiles de la segunda propuesta de diseño.

| Puntos fuertes | Puntos débiles |
|--|--|
| Puede controlarse la fuerza de bruñido que ejercerá la esfera sobre la superficie de la pieza. | El diseño del mecanismo es poco eficaz debido a que se pierde brazo de palanca y el muelle tiene que estar sobredimensionado |
| Cabezal roscado para una fácil manipulación de la esfera, que se desgasta y periódicamente necesita cambiarse. | La herramienta podría ser más compacta, ya que sobresale en exceso del carro portaherramientas. |
| Puede bruñir piezas de cualquier tamaño, como único limitante el diámetro del cabezal de la herramienta. | |
| Cabezal de la herramienta muy compacto | |

La segunda propuesta de diseño cumple con la mayoría de condicionantes impuestos para este proyecto, así que se ha decidido seguir con esta idea conceptual de la herramienta y mejorar los puntos débiles, para finalmente obtener un diseño dimensionado, calculado y optimizado.

3.1.3. SOLUCIÓN ADOPTADA

Finalmente se ha optado por un diseño similar al de la segunda propuesta, con un brazo basculante al que se le aplicará una fuerza controlada mediante un muelle dimensionado y calculado. La herramienta en sí misma es novedosa ya que no se comercializan muchas herramientas de estas características y el mecanismo que usa no está inspirado en ninguna herramienta que se haya fabricado con anterioridad.

Tal y como ya se ha comentado, la solución adoptada es similar al segundo diseño, el cual tenía algunos puntos débiles a solucionar, y se decidió para este proyecto seguir con la misma idea conceptual:

- Se ha cambiado el diseño del brazo, el cual ahora el brazo de palanca del muelle es exactamente el mismo que el brazo de palanca del cabezal, igualando las fuerzas y evitando sobredimensionamientos en el muelle.
- Se ha cambiado la situación del muelle en el diseño, para optimizar la fuerza que ejerce y además conseguir un diseño más compacto de la herramienta.

En la figura 23 se muestra un croquis de la idea conceptual de la herramienta.

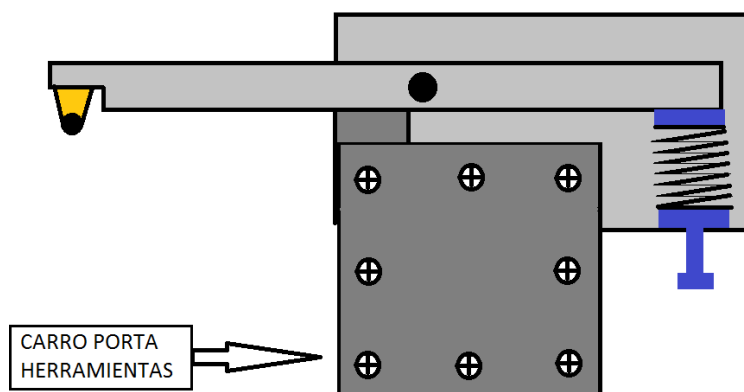


Fig. 23. Idea conceptual de la herramienta que se va a diseñar.

El brazo de la herramienta bascula desde su centro y simétricamente se generarán las fuerzas tanto del muelle sobre el brazo como de la pieza hacia el cabezal. El nuevo diseño optimiza la distribución de fuerzas, ya que la simetría consigue solucionar el punto débil que tenía la anterior propuesta de diseño en la que el muelle tendría que sobredimensionarse y aplicar una fuerza mayor a la necesaria, para suplir el problema del brazo de palanca, aplicando más fuerza cortante sobre el pasador y aumentando las sollicitaciones para las piezas.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

En el presente apartado se hará una descripción exhaustiva del diseño de la herramienta, explicando pieza por pieza su funcionalidad y características principales.

Se ha establecido el material con el que se fabricará la herramienta: Acero AISI F1140, un acero de gran maquinabilidad, barato y ampliamente utilizado en la fabricación de herramientas.

Para el dimensionamiento del muelle se ha tenido en cuenta las fuerzas que se requieren en este diseño y se ha seleccionado de catálogo el que mejor se adaptaba, centrándose en las dimensiones y el rango de fuerzas que puede ejercer dependiendo de la precarga aplicada.

BASE

La base de la herramienta consta de un cuerpo plano, que se sujeta al carro porta herramientas del torno convencional. Soldados al cuerpo plano tiene un pasador y un cilindro roscado. En la figura 24 se muestra una captura del SolidWorks del diseño de la base.

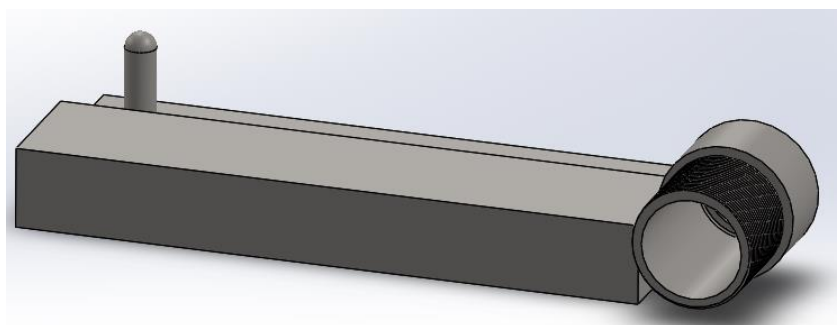


Fig. 24. Base de la herramienta

El pasador se encarga de permitir la rotación del brazo así como de soportar las cargas cortantes de 500N que se generan debido a la fuerza del muelle más la reacción de la pieza sobre la herramienta.

El tubo roscado tiene la funcionalidad de contener tanto el muelle como otras piezas que se explicarán seguidamente. Tiene una rosca para permitir precargar el muelle, comprimiéndolo, la distancia que se necesite en cada proceso de bruñido. También tiene un tope para evitar que el muelle pueda ejercer fuerza en el brazo cuando éste no se encuentre en su posición correcta.

BRAZO

El brazo de la herramienta es el encargado de transmitir e invertir el sentido de la fuerza del muelle al cabezal de la herramienta. Tiene un agujero transversal en su punto medio, por donde se inserta el pasador y un rodamiento para permitir la rotación del brazo. A continuación se muestra el brazo diseñado.

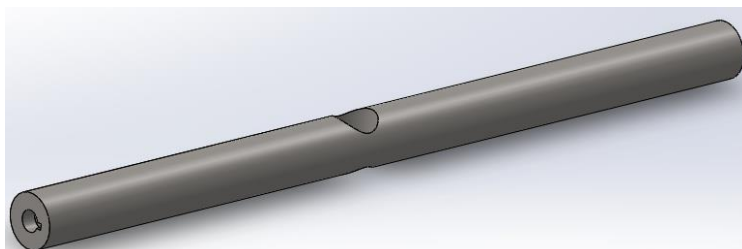


Fig. 25. Brazo de la herramienta

Está diseñado para tener una distribución simétrica de las fuerzas que actúan sobre el mismo, optimizando el dimensionamiento del muelle. El brazo es esbelto y permite bruñir interiores de cilindros hasta una profundidad de 140mm. Tiene un diámetro de 18mm, sobredimensionado de manera intencionada, para que pueda soportar el momento flector en el punto máximo y reducir las deformaciones que pueda sufrir a lo largo de su longitud.

PIEZA GUÍA

La pieza guía se encuentra dentro del tubo roscado de la base de la herramienta. Se encarga principalmente de sujetar el brazo para poder transmitir la fuerza del muelle perpendicularmente. En la figura 26 se muestra el diseño de la pieza guía.

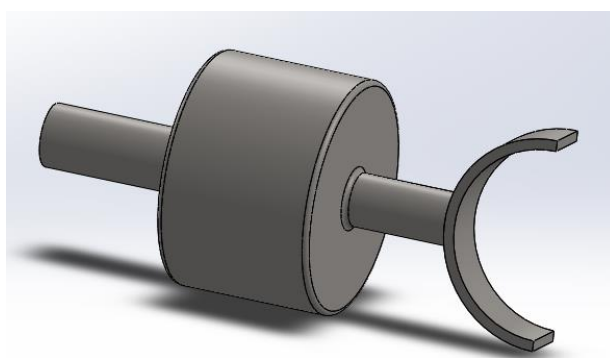


Fig. 26. Pieza guía

La pieza guía se puede dividir en tres partes diferenciadas:

El cilindro pequeño, de diámetro 10mm se coloca en el interior del muelle, guiándolo para que no se doble y no se falsee la fuerza que está ejerciendo.

El cilindro grande, de diámetro 22,5mm se encarga de permitir el deslizamiento de la pieza a lo largo del interior del tubo roscado, siendo un deslizamiento lineal con una tolerancia geométrica. También actúa de tope, junto con el tubo roscado de la base de la herramienta.

El gancho es el que está en contacto con el brazo y el que transmite la fuerza del muelle. Tiene forma de gancho para mejorar el montaje y el desmontaje del brazo y sujetar y controlar su posición en todo momento, sobre todo cuando no está realizando el proceso de bruñido.

TAPA MUELLE

La tapa del muelle tiene una rosca interior y es la encargada de ejercer la precarga al muelle. Se puede roscar sobre el tubo de la base para conseguir la precarga requerida en cada proceso de bruñido. A continuación se muestra una fotografía de la tapa del muelle.

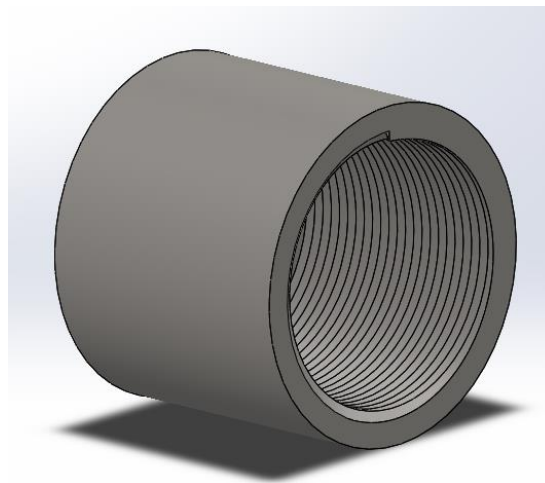


Fig. 27. Tapa muelle

Mediante la rosca se puede saber los milímetros que equivalen a una vuelta y, por lo tanto, cuantas vueltas se necesitan para comprimir el muelle a una distancia determinada. Sabiendo las propiedades del muelle, se puede controlar la fuerza que éste ejerce en cada punto de su elongación.

CABEZALES INTERCAMBIABLES

Los cabezales intercambiables se fijan en uno de los extremos del brazo mediante un tornillo. Están dimensionados para cumplir con la distribución simétrica de las fuerzas en la herramienta. La figura 28 muestra el cabezal para bolas de 10mm de diámetro.

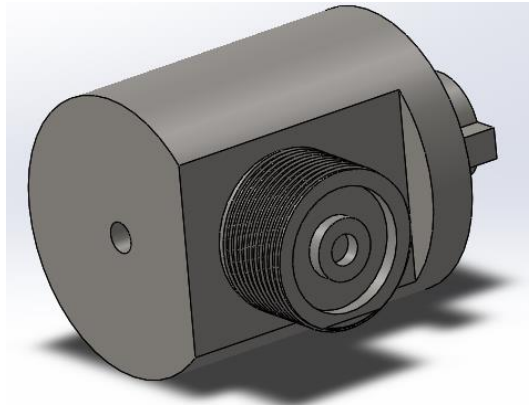


Fig. 28. Cabezal de la herramienta

Los cabezales tienen la función de completar la longitud del muelle y contienen las esferas de rodadura, los casquillos y las esferas bruñidoras. Cada cabezal tiene soldado un cilindro roscado para fijar los casquillos y unos topes circulares para guiar a las esferas de rodadura.

Se pueden diseñar cabezales para conseguir cualquier tipo de bruñido:

- Cabezal para bola de 8mm diámetro.
- Cabezal para bola de 10mm diámetro.
- Cabezal para bola de 12mm diámetro,
- Cabezal con un dimensionamiento muy optimizado para bruñir interiores de tubos muy pequeños.
- Cabezal dimensionado para poder bruñir interiores de tubos con diámetros variables.

Gracias a los cabezales intercambiables gana mucha versatilidad, ya que con una sola herramienta se pueden conseguir muchos tipos distintos de bruñido.

CASQUILLOS

Los casquillos diseñados van roscados a los cabezales y su única función es la de sostener la esfera permitiendo que rote libremente, pero manteniéndola en el sitio para el que ha sido diseñada. La figura 29 muestra el casquillo que se rosca en el cabezal para bola de 10mm.

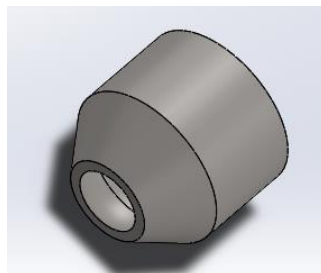


Fig. 29. Casquillo del cabezal.

3.3. ELEMENTOS NORMALIZADOS

MUELLE

Muelle: B13 – 038

Suministrador: Todomuelles.

El muelle es el elemento encargado de aplicar una fuerza controlada y calculada previamente. Además, el muelle tiene que poder generar fuerzas en un rango definido dependiendo del nivel de precarga que se le aplique.

Para la selección del muelle se han tenido en consideración que las dimensiones sean reducidas y que según su nivel de precarga pueda aplicar fuerzas entre 100 y 250 N. Además, el muelle tiene que poder generar fuerzas superiores a 250N para no forzar un colapso de este o trabajar con una contracción cercana a su límite.

El muelle seleccionado es el B13 – 038 del catálogo de todomuelles.com, que cumple todos los requisitos explicados previamente. Este muelle mide 38mm de largo, tiene un diámetro exterior de 12.5mm y un diámetro interior de 6.3mm. Además puede generar fuerzas de hasta 306N sin forzar su diseño y la progresión de fuerzas según la precarga es adecuada para aportar más comodidad al operario que calibre la herramienta antes de empezar a bruñir. La figura 30 muestra un ejemplo de la morfología del muelle seleccionado.



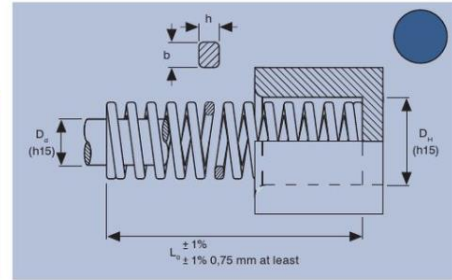
Fig. 30. Muelle B13-038

La siguiente figura muestra un fragmento del catálogo de todomuelles con el muelle seleccionado marcado en rojo.

Sección rectangular ISO 10243

Muelles carga mediana

| | |
|-----------|------------------------------|
| C | MOLLES CÀRREGA MITJANA |
| GB | MEDIUM LOAD SPRINGS |
| F | RESSORTS CHARGE MOYENNE |
| D | FEDERN FÜR MITTLERE SPANNUNG |












| |  D _H Hole Diameter |  D _d Rod Diameter |  L ₀ Free Length |  R Spring Constant |  A 25% L ₀ |  B 30% L ₀ |  C 35% L ₀ |  D 40% L ₀ |  E Do not use | | | | |
|------------|--|---|--|---|---|---|---|---|---|-----|------|-----|------|
| | b x h | | | ± 10% | + 3.000.000 | ~ 1.500.000 | 300 - 500.000 | 100 - 200.000 | | | | | |
| Ref. | mm | mm | mm | N/mm | N | N | mm | N | mm | | | | |
| B 13 - 025 | 12.5 | 6.3 | 25 | 30.0 | 6.3 | 189 | 7.5 | 225 | 8.4 | 253 | 9.4 | 282 | 11.9 |
| B 13 - 032 | | | 32 | 24.8 | 8.0 | 198 | 9.6 | 238 | 10.8 | 268 | 12.0 | 298 | 16.2 |
| B 13 - 038 | | | 38 | 21.4 | 9.5 | 203 | 11.4 | 244 | 12.8 | 274 | 14.3 | 306 | 18.7 |
| B 13 - 044 | | | 44 | 18.5 | 11.0 | 204 | 13.2 | 244 | 14.9 | 275 | 16.5 | 305 | 21.3 |
| B 13 - 051 | | | 51 | 15.5 | 12.8 | 198 | 15.3 | 237 | 17.2 | 267 | 19.1 | 296 | 25.6 |
| B 13 - 064 | | | 64 | 12.1 | 16.0 | 194 | 19.2 | 232 | 21.6 | 261 | 24.0 | 290 | 32.4 |

Fig. 31. Muelle seleccionado del catálogo de todomuelles.com

RODAMIENTO

Rodamiento: NX 7 ZTN

Suministrador: SKF

El rodamiento es el encargado de permitir una rotación libre y suave entre el brazo y el pasador soldado a la base de la herramienta. El rodamiento seleccionado tiene que cumplir requisitos dimensionales y además tiene que soportar las cargas estáticas y dinámicas que sufra cuando la herramienta esté realizando el proceso de bruñido. La figura 32 muestra una imagen del rodamiento seleccionado, facilitada por SKF.

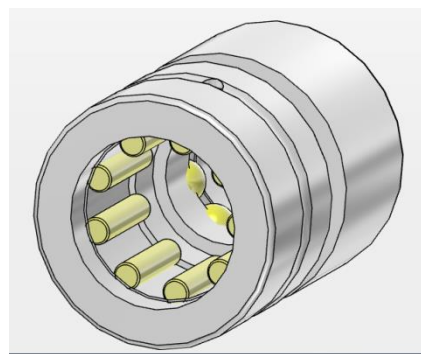
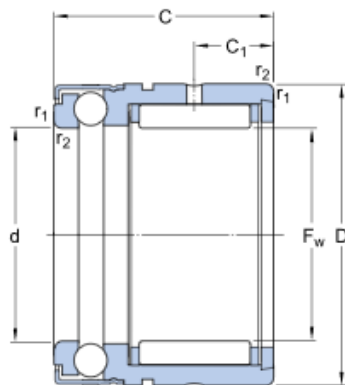


Fig. 32. Rodamiento seleccionado NX 7 ZTN de SKF

Este rodamiento de rodillos tiene un diámetro interior de 7mm y un diámetro exterior de 14mm. Según los cálculos realizados con anterioridad, el pasador de acero F114 de 7mm de diámetro soportará las cargas. Las figuras 33 y 34 muestran tanto las dimensiones como otros datos técnicos del rodamiento seleccionado.



| | |
|-----------|----------|
| F_w | 7 |
| D | 14 |
| C | 18 |
| C_1 | 4.7 |
| d | 7 |
| $r_{1,2}$ | min. 0.3 |

Fig. 33. Dimensiones del rodamiento NX 7 ZTN

Calculation data

| | | |
|---|-------|-------|
| Basic dynamic load rating, radial direction | C | 2.81 |
| Basic static load rating, radial direction | C_0 | 2.75 |
| Basic dynamic load rating, axial direction | C | 3.45 |
| Basic static load rating, axial direction | C_0 | 5 |
| Fatigue load limit, radial direction | P_u | 0.29 |
| Fatigue load limit, axial direction | P_u | 0.186 |
| Reference speed | | 10000 |
| Limiting speed | | 6000 |

Mass

| | |
|--------------|-------|
| Mass bearing | 0.014 |
|--------------|-------|

Fig. 34. Datos técnicos del rodamiento NX 7 ZTN

El rodamiento está sobredimensionado voluntariamente debido a se ha dado preferencia a los requerimientos dimensionales del brazo y del pasador, teniendo en cuenta que cualquier rodamiento estará sobredimensionado.

TORNILLO

Tornillo: Tornillo cabeza cilíndrica allen DIN-912

Suministrador: Tornillería Reche, S.L.

El tornillo tiene la función de fijar el cabezal al brazo: Tanto el cabezal como el brazo tienen agujeros longitudinales axiales que permiten roscar un tornillo que fije ambas piezas.

El modelo de tornillo seleccionado tiene un diámetro de caña de 4 milímetros y se puede encontrar con longitudes de 10 a 70 milímetros. En la siguiente figura se muestran las dimensiones principales del tornillo seleccionado.

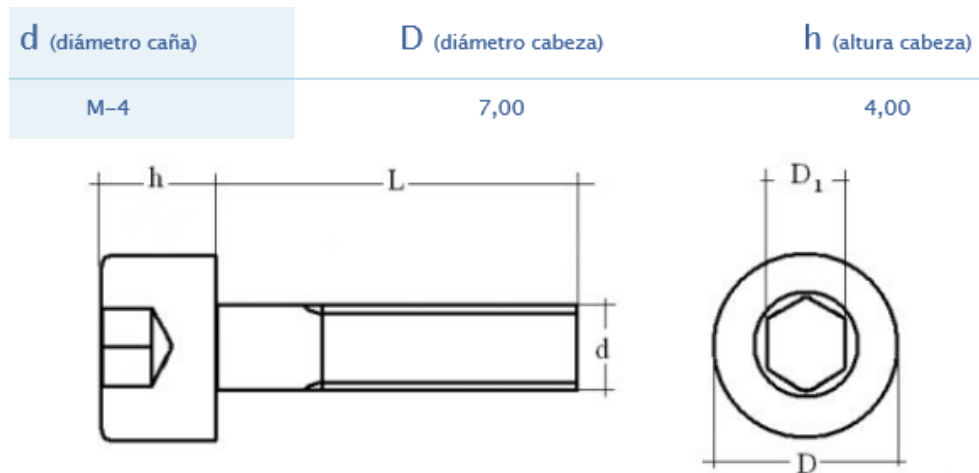


Fig. 35. Dimensiones principales del tornillo con cabeza cilíndrica allen DIN-912

3.4. OTROS ELEMENTOS DEL DISEÑO

En este apartado se muestran las bolas, que no se fabricarán y tampoco son elementos normalizados. Tanto las bolas bruñidoras (de distintos diámetros para distintos cabezales) como las bolas de rodadura (que tienen una función similar a la de un rodamiento) están hechas de acero al cromo endurecido (100Cr6), de aproximadamente 57-66 HRC.

BOLAS BRUÑIDORAS

Las bolas bruñidoras son la única parte de la herramienta en contacto con la pieza. Las esferas, de gran dureza, pasan por la superficie y alisan los picos, mejorando la rugosidad entre otras cosas. Dependiendo del diámetro de la esfera, se consiguen unos valores concretos. En el presente trabajo se han contemplado esferas de 8, 10 y 12 mm. La figura 36 muestra una imagen de la bola bruñidora de acero al cromo de 10 mm de diámetro.

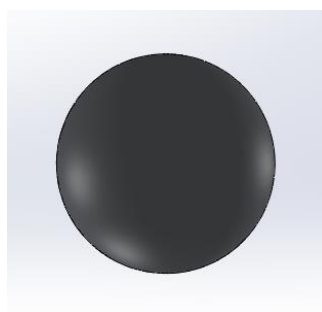


Fig.36. Bola bruñidora de acero al cromo.

BOLAS DE RODADURA

Las que se han denominado esferas de rodadura son las pequeñas bolas que están apoyadas en el cabezal para permitir una libre rotación con baja fricción de la esfera bruñidora. La siguiente figura muestra la localización de las 8 bolas de rodadura de 2mm que se necesitan para el cabezal de 10 mm.

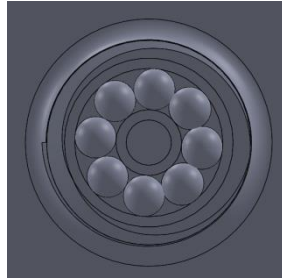


Fig. 37. Esferas de rodadura

Las esferas de rodadura permiten una libre rotación de la esfera bruñidora además de absorber esfuerzos axiales optimizando el espacio. Otra opción que se estudió fue poner un rodamiento cónico, pero en comparación con la solución adoptada se descartó por tamaño.

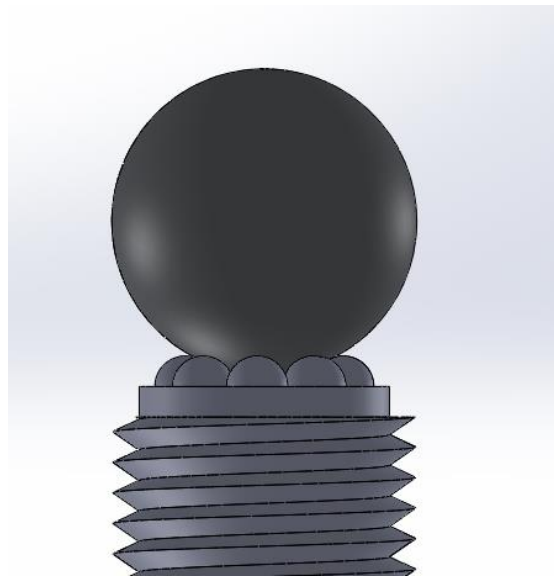


Fig. 38. Detalle del ensamble de la bola bruñidora en el cabezal.

A continuación se muestra una imagen del ensamblaje de todas las piezas que conforman la herramienta acabada.

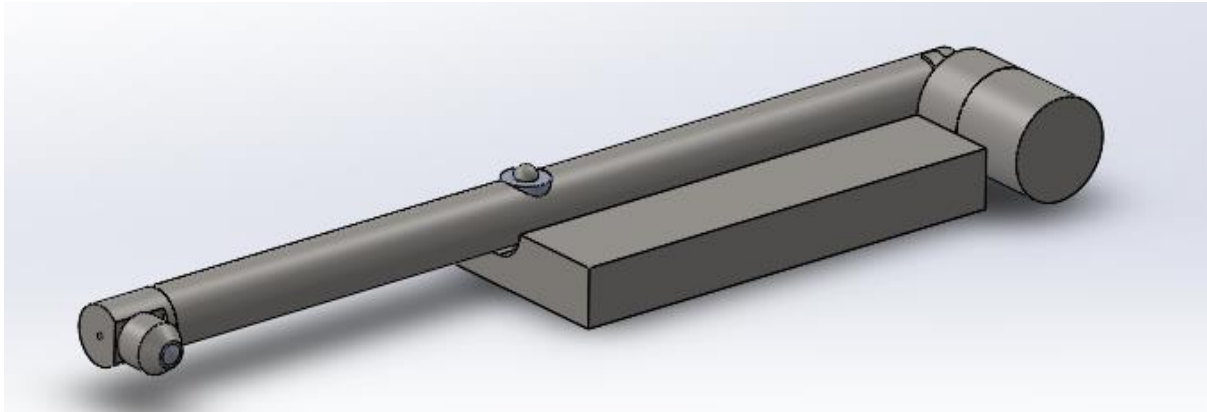


Fig. 39. Ensamblaje de la herramienta acabada.

Se ha creído conveniente mostrar una vista explosionada de la herramienta para facilitar la comprensión del montaje completo.

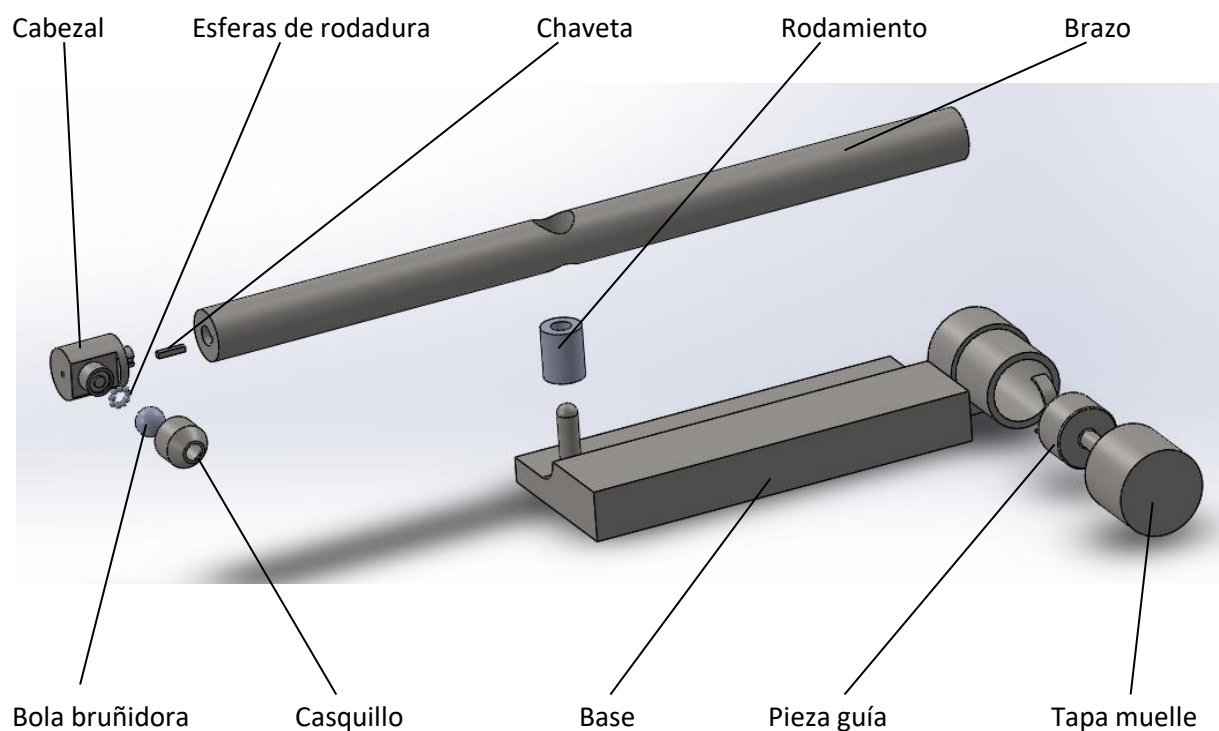


Fig 40. Vista explosionada de la herramienta de bruñido con bola.

3.5. PLANOS

Los planos dimensionales de la herramienta y todas las piezas que la conforman se pueden encontrar en el anexo 1 de este trabajo (ANEXO1. PLANOS).

4.CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Para poder realizar un buen diseño hay que justificar las decisiones tomadas con cálculos para evitar sobredimensionamientos no intencionados, funcionamientos deficientes o incluso una rotura de la herramienta.

En los siguientes cálculos se ha usado el cálculo de vigas para saber la deformación máxima que sufrirán las piezas esbeltas, el cálculo de ejes para conocer el factor de seguridad con el que trabajarán las piezas, el cálculo de tolerancias y ajustes para garantizar el movimiento o el apriete entre las distintas piezas que conforman la herramienta y finalmente se ha usado el simulador de esfuerzos del SolidWorks para confirmar la fiabilidad de los cálculos realizados.

Para poder realizar estos cálculos, primero hay que seleccionar el material con el que se fabricará la herramienta para poder extraer los datos necesarios.

El material escogido es el acero F114, con un módulo elástico $E=2100000 \text{ kg/cm}^2$ y una tensión admisible máxima de 24.66 kN/cm^2 (246.6 Mpa).

4.1 DEFORMACIONES EN CUERPOS ESVELTOS.

PASADOR

El pasador tiene que poder aguantar las fuerzas cortantes de 500 N y un momento flector de 5 N provocado por la carga distribuida que generará el brazo sobre éste.

La figura 41 muestra la distribución de fuerzas que actúan sobre el pasador, y las dimensiones de éste.

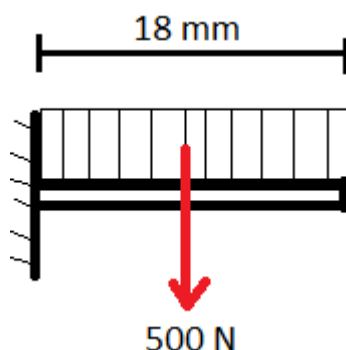


Fig. 41. Esquema de la distribución de fuerzas que actúan sobre el pasador.

La siguiente figura muestra los diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores que actúan en el pasador

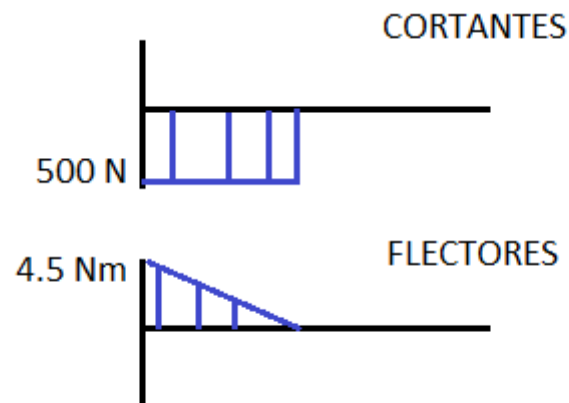


Fig. 42. Diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores.

Para calcular las deformaciones, usaremos el método de cálculo de momento virtual.

CORTE I

La figura 43 muestra el primer y único corte del pasador.

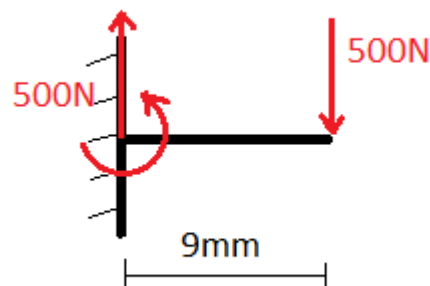


Fig. 43. Primer corte pasador

$$\left. \begin{array}{l} M = 5 - 500x \\ m = 0.01 - x \end{array} \right\} 0.05 - 10x + 500x^2$$

$$(2) \quad \Delta V = \int_0^{0.01} 500x^2 - 10x + 0.05$$

$$\left[\frac{500x^3}{3} - \frac{10x^2}{2} + 0.05x \right]_0^{0.01} = 1.667 * 10^4$$

La deformación de la pieza es dependiente del módulo de elasticidad del material con el que está hecha (acero F114) y de la forma de dicha pieza, ya que según la forma que tenga, su módulo de inercia cambiará.

Para calcular la deformación se usa la siguiente expresión:

$$(3) \quad DEF = \frac{\Delta V}{E \cdot I} = \frac{1.667 \cdot 10^{-4}}{2.1 \cdot 59.21} = \mathbf{1.34 \cdot 10^{-6} cm}$$

Donde:

$$E = 2.1 \cdot 10^6$$

$$(4) \quad I = \frac{1}{2} MR^2 = \frac{1}{2} \cdot 2.4168 \cdot 10^{-2} \cdot 0.0035^2 = 5.921 \cdot 10^{-7} m^4 = \mathbf{59.21 cm^4}$$

$$(5) \quad M = \rho \cdot V = 7850 \cdot 3.0787 \cdot 10^{-6} = \mathbf{2.4168 \cdot 10^{-2} kg}$$

$$(6) \quad V = \pi \cdot R^2 \cdot L = \pi \cdot 0.007^2 \cdot 0.02 = \mathbf{3.0787 \cdot 10^{-6} m^3}$$

BRAZO DE LA HERRAMIENTA

El brazo de la herramienta es la pieza encargada de invertir el sentido de la fuerza que genera el muelle. Tiene que ser esbelto para poder insertarse en tubos hasta una profundidad mínima y tiene que ser rígido para evitar deformaciones que interfieran en el proceso de bruñido.

La figura 44 muestra el brazo transformado en una viga de 300 mm biapoyada con una fuerza vertical en el extremo derecho.

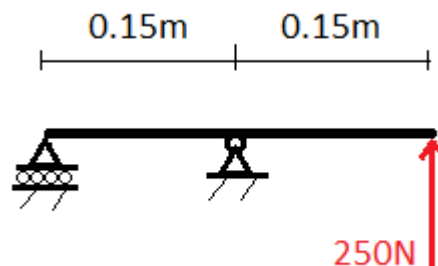


Fig. 44. Brazo de la herramienta para el cálculo de deformaciones

$$(7) \quad \sum Fy = 0$$

$$RAy + F = RBy \rightarrow RAy = 250N$$

$$\sum Ma = 0$$

$$F + 0.3 = RAy * 0.15 \rightarrow RB_y = 500N$$

Para calcular las deformaciones, usaremos el método de cálculo de momento virtual.

CORTE I

La siguiente figura muestra la distribución de fuerzas que actúan en el primer corte del brazo.

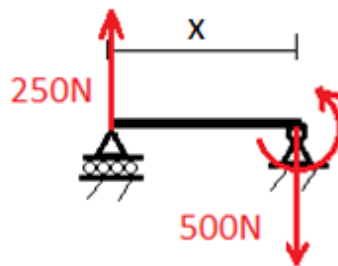


Fig. 45. Primer corte brazo

$$0 \leq X \leq 0.15$$

$$\sum M = 0$$

$$M - 250x = 0 \rightarrow M = 250x$$

CORTE II

La siguiente figura muestra la distribución de fuerzas que actúan en el segundo corte del brazo.

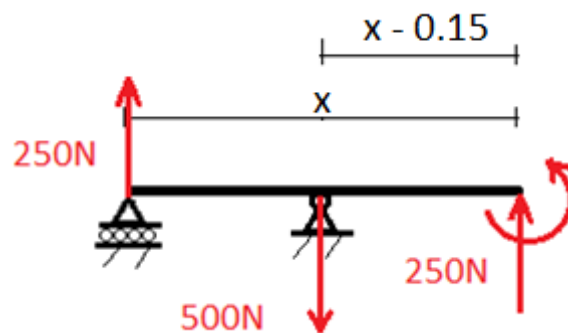


Fig. 46. Segundo corte brazo

$$0.15 \leq X \leq 0.30$$

$$\sum M = 0$$

$$M - 250x + 500(x - 0.15) = 0$$

$$M - 250x + 500x - 75 = 0$$

$$M = -250x + 75$$

MOMENTO VIRTUAL

La figura 47 muestra la simplificación de las fuerzas que actúan en la estructura, correspondiente al segundo paso del método de cálculo del momento virtual.

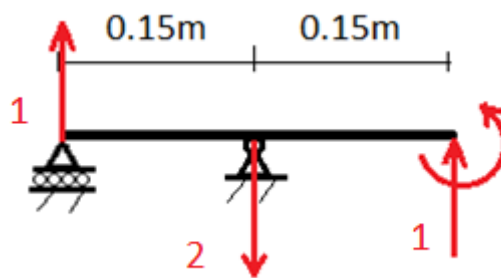


Fig. 47. Distribución de fuerzas momento virtual

CORTE I

La siguiente figura muestra la distribución de fuerzas que actúan en el primer corte según dicta el método del momento virtual.

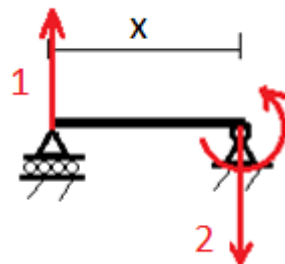


Fig. 48. Primer corte brazo momento virtual

$$0 \leq X \leq 0.15$$

$$\sum M = 0$$

$$M - 1x = 0 \rightarrow M = x$$

CORTE II

La figura 49 muestra la distribución de fuerzas que actúan en el segundo corte según dicta el método del momento virtual.

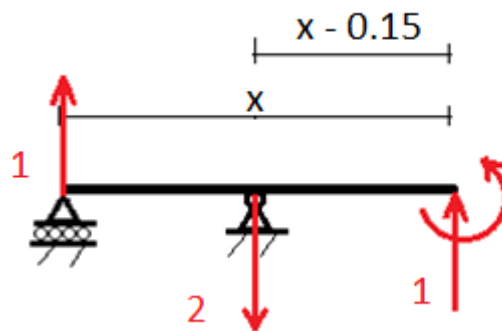


Fig. 49. Segundo corte brazo momento virtual

$$0.15 \leq X \leq 0.30$$

$$\sum M = 0$$

$$M - 1x + 2(x - 0.15) = 0$$

$$M + x - 0.3 = 0$$

$$M = -x + 0.3$$

$$M = 250x$$

$$m = x$$

$$M \cdot m = 250x^2$$

$$\left. \begin{array}{l} M = -250x + 75 \\ m = -x + 0.3 \end{array} \right\} M \cdot m = 250x^2 - 150x + 22.5$$

$$\Delta V = \int_0^{0.15} 250x^2 - 150x + 22.5$$

$$\left[\frac{250x^3}{3} - \frac{150x^2}{2} + 22.5x \right]_0^{0.15} - \left[\frac{250x^3}{3} - \frac{150x^2}{2} + 22.5x \right]_{0.15}^{0.30} = \mathbf{0.5625 \text{ kg f/m}^3}$$

La deformación de la pieza es dependiente del módulo de elasticidad del material con el que está hecha (acero F114) y de la forma de dicha pieza, ya que según la forma que tenga, su módulo de inercia cambiará.

Para calcular la deformación se usa la siguiente expresión:

$$DEF = \frac{\Delta V}{E * I} = \frac{\mathbf{0.5625}}{2.1 * 2427.06} = \mathbf{1.103628 * 10^{-4} cm}$$

Donde:

$$E = 2.1 * 10^6$$

$$I = \frac{1}{2} MR^2 = \frac{1}{2} * 0.59927 * 0.009^2 = 2.4271 * 10^{-5} m^4 = \mathbf{2427.06 \text{ cm}^4}$$

$$M = \rho * V = 7850 * 7.6341 * 10^{-5} = \mathbf{0.59927 \text{ kg}}$$

$$V = \pi * R^2 * L = \pi * 0.009^2 * 0.3 = \mathbf{7.6341 * 10^{-5} m^3}$$

4.2. FACTOR DE SEGURIDAD

Es importante un dimensionamiento correcto de las piezas, ya que la herramienta no debe romperse, pero a su vez no puede estar excesivamente sobredimensionada, ya que el coste de fabricación de ésta se dispararía. A continuación se va a calcular el factor de seguridad con el que trabajan las piezas, para saber si hay que hacer modificaciones en el dimensionamiento.

BASE DE LA HERRAMIENTA

Pasador

La sección crítica de la pieza corresponde a la parte inferior del pasador, en el punto donde se junta con la base de la herramienta mediante soldadura. Aunque se haya diseñado con un canto redondeado para evitar concentradores de tensiones, ese punto es el que absorbe el mayor momento flector provocado por el brazo. En ese caso se ha considerado ese punto como crítico y es el que se ha calculado.

La figura 50 muestra las solicitaciones del pasador. El esfuerzo cortante se ha considerado no relevante debido a que cuando el momento flector es máximo, el esfuerzo cortante es 0.



Fig. 50. Tensiones en la sección crítica del pasador.

$$(8) \quad \sigma = \frac{Mf \cdot y}{I_z} = \frac{4.5 \cdot 0.0035}{\frac{\pi \cdot 0.007^4}{64}} = 133.635 \text{ MPa}$$

$$(9) \quad FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} = 1.98$$

Cilindro

Se ha denominado cilindro a la parte de la base de la herramienta que contiene el muelle, la pieza guía y donde se rosca la tapa del muelle. La sección crítica se encuentra en el tope, cuyo radio es inferior y el cambio de sección es muy brusco.

La siguiente figura muestra las tensiones de compresión que se aplican sobre la sección crítica del pasador.

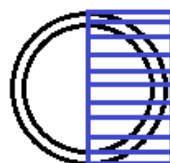


Fig. 51. Tensiones en la sección crítica del cilindro de la base.

$$(10) \quad \sigma = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 250}{\pi \cdot (0.022 - 0.020)^2} = 79.577 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} = 3.1$$

Brazo

La sección crítica de la pieza corresponde a la parte central del brazo, donde hay un agujero por el que es atravesado por el pasador. Este punto es el que absorbe el momento flector máximo y además es el que tiene una sección más pequeña debido al agujero. En ese caso se ha considerado ese punto como crítico y es el que se ha calculado.

La siguiente figura muestra las tensiones en la sección crítica del brazo, en el agujero que atraviesa perpendicularmente al brazo.

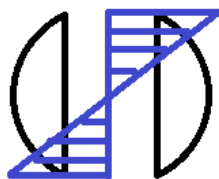


Fig. 52. Tensiones en la sección crítica del brazo.

$$(11) \quad \sigma = \frac{Mf \cdot y}{I_z} = \frac{37.5 \cdot 0.009}{\pi \cdot \frac{0.018^4}{64} - \frac{0.007 \cdot 0.018^3}{12}} = 192.757 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} = 1.28$$

Pieza guía

La sección crítica se encuentra en el cilindro de radio más pequeño, que además es el que está en contacto con el brazo de la herramienta y transmite la fuerza del muelle axialmente. Se ha dimensionado con dimensiones optimizadas debido a que se cree que las cargas axiales de compresión no suponen una sollicitación importante.

La figura 53 muestra el punto crítico de la pieza guía.



Fig. 53. Tensiones en la sección crítica de la pieza guía.

$$(12) \quad \sigma = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 250}{\pi \cdot 0.005^2} = 12.732 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} = 19.37$$

Tapa muelle

La tapa del muelle se encarga de controlar la precarga aplicada al muelle. Se puede conocer la precarga contando las vueltas que se le ha dado a la rosca, sabiendo el paso de la rosca y como le afecta la compresión a la precarga del muelle.

La rosca es M22 x 1.5, una rosca métrica estándar de paso fino. Se ha seleccionado el paso fino debido a que se va a estar roscando y desenroscando continuamente. La superficie roscada es de 21 mm para conseguir precargar el muelle hasta su máximo, así que las 14 vueltas son más que suficientes para soportar los 250 N.

Se ha creído conveniente calcular la sección que soportará las tensiones cortantes que aplicará el muelle.

La figura 54 muestra las tensiones cortantes en la tapa.



Fig. 54. Tensiones en la sección crítica de la tapa.

$$(13) \quad \sigma = \frac{3F}{2bh} = \frac{3 \cdot 250}{2 \cdot 0.002 \cdot 0.002} = 93.750 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} = 2.63$$

Cabezal

La sección crítica del cabezal se encuentra en la unión al brazo, donde se reduce su diámetro y el momento flector es máximo.

La siguiente figura muestra las tensiones de flexión en la sección crítica del cabezal.

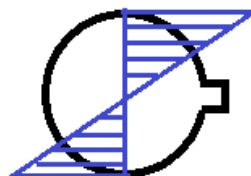


Fig. 55. Tensiones en la sección crítica del cabezal.

Para calcular el momento de inercia se usará el teorema de Steiner, en el que se toma un eje Z' paralelo al eje Z para calcular el momento de inercia que genera el saliente.

$$(14) \quad \sigma = \frac{Mf \cdot y}{I_z} = \frac{7.5 \cdot 0.005}{\pi \cdot \frac{0.01^4}{64} + \frac{0.001 \cdot 0.01^3}{12} + Ar^2} = 76.381 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{eq}} = 3.23$$

Seguidamente se muestra una tabla donde se recogen los factores de seguridad de todas las piezas que conforman la herramienta.

Tabla 3. Factores de seguridad de las piezas de la herramienta

| PIEZA | F.S. |
|-------------|-------|
| PASADOR | 1.98 |
| CILINDRO | 3.1 |
| BRAZO | 1.28 |
| PIEZA GUÍA | 19.37 |
| TAPA MUELLE | 2.63 |
| CABEZAL | 3.23 |

4.3. SIMULACIONES DE LAS PIEZAS.

Comprobar y revisar que los cálculos estén bien hechos es un punto muy importante antes de fabricar la herramienta. Se ha usado un segundo método de cálculo, mediante SolidWorks, para poder comprobar de manera visual que la herramienta no está mal dimensionada. La herramienta que proporciona SolidWorks es un simulador de deformaciones en el que se pueden simular solicitaciones en piezas diseñadas previamente y ver las deformaciones que sufrirá dicha pieza.

Se ha hecho una simulación con cada una de las piezas que conforman la herramienta a modo de comprobación del diseño.

Base de la herramienta

El pasador tiene que soportar los esfuerzos que genera el muelle y la reacción que ejerce la pieza sobre la herramienta. Además, el cilindro también tiene que soportar la fuerza del muelle. La siguiente figura muestra las deformaciones que sufrirá la base de la herramienta como consecuencia de las solicitaciones que afectan a la herramienta.

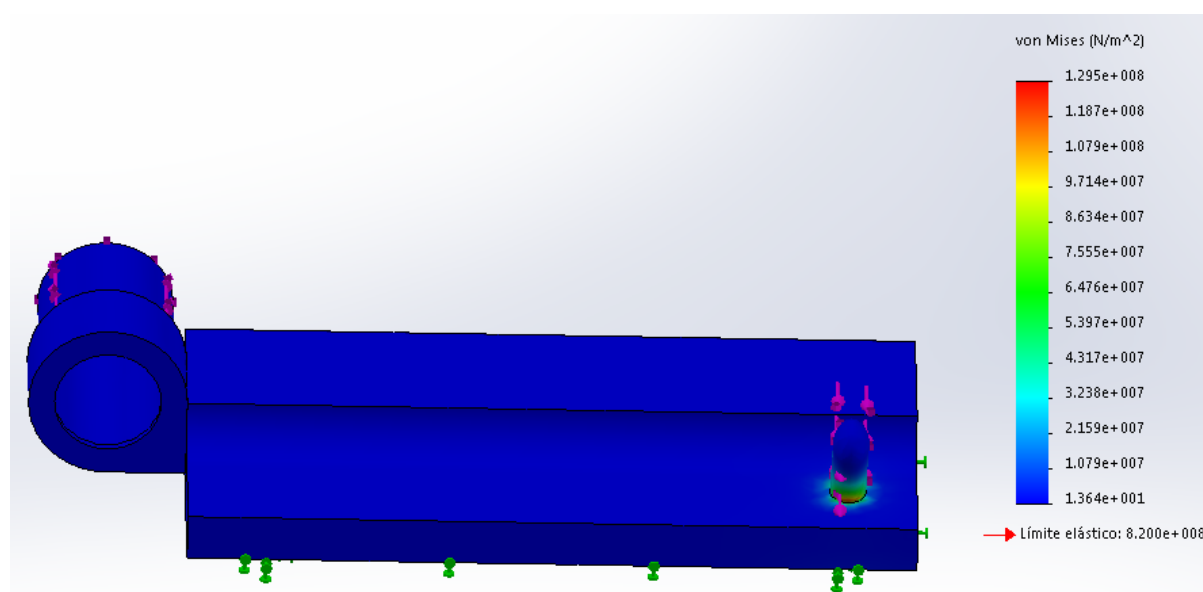


Fig. 56. Deformaciones en la base de la herramienta.

Brazo

El brazo tiene que soportar la fuerza del muelle, la fuerza de la pieza sobre la herramienta y las reacciones en el agujero. La siguiente figura muestra las deformaciones que sufrirá el brazo de la herramienta como consecuencia de las sollicitaciones que afectan a la herramienta.

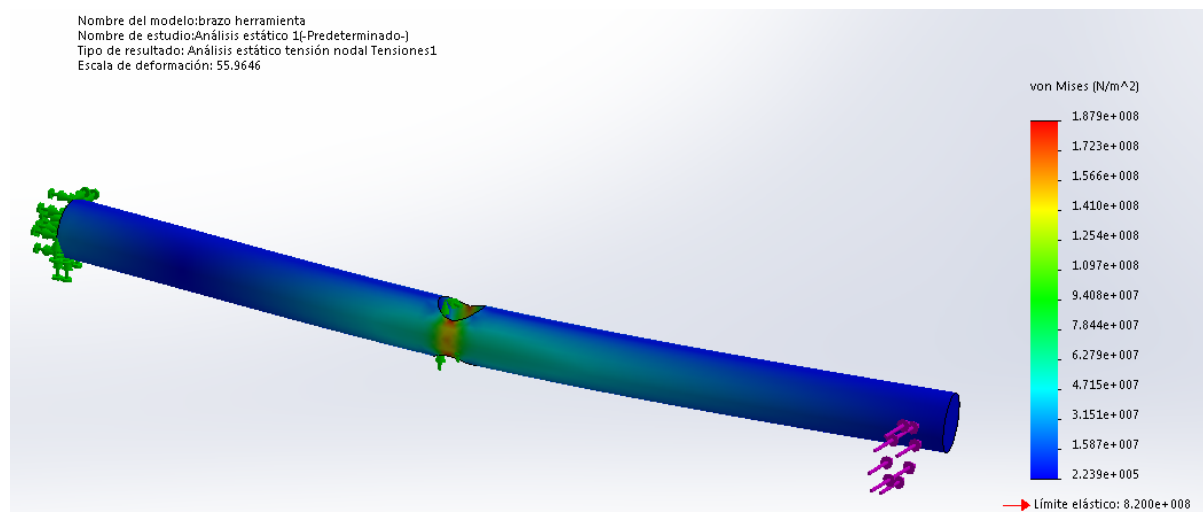


Fig. 57. Deformaciones en el brazo de la herramienta.

Pieza guía

La pieza guía tiene que soportar los esfuerzos a compresión del muelle y el brazo. La siguiente figura muestra las deformaciones que sufrirá la pieza guía como consecuencia de las sollicitaciones que afectan a la herramienta.

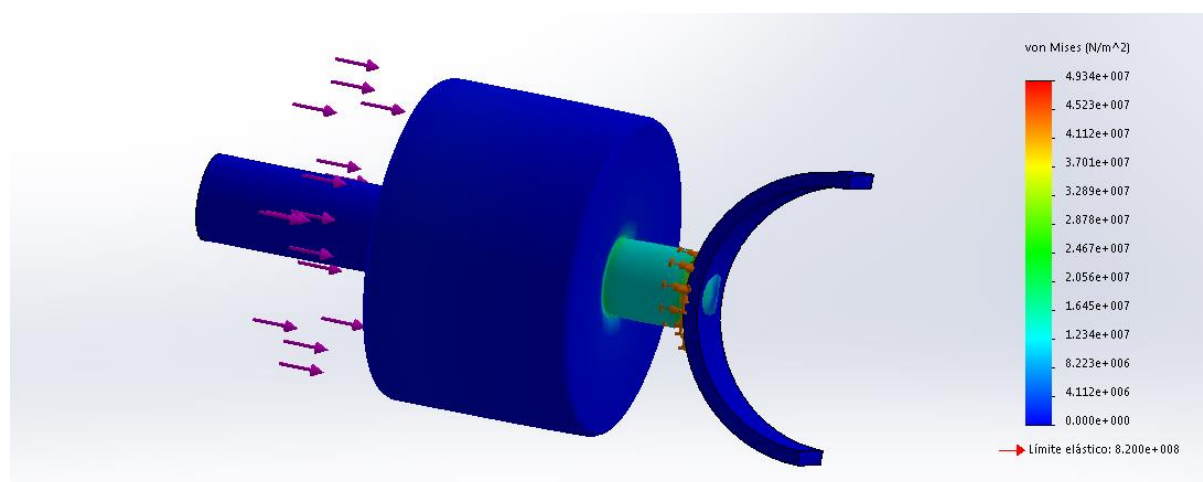


Fig. 58. Deformaciones en la pieza guía.

Tapa muelle

La tapa del muelle únicamente tiene que soportar la fuerza del muelle. La siguiente figura muestra las deformaciones que sufrirá la tapa del muelle como consecuencia de las sollicitaciones que afectan a la herramienta.

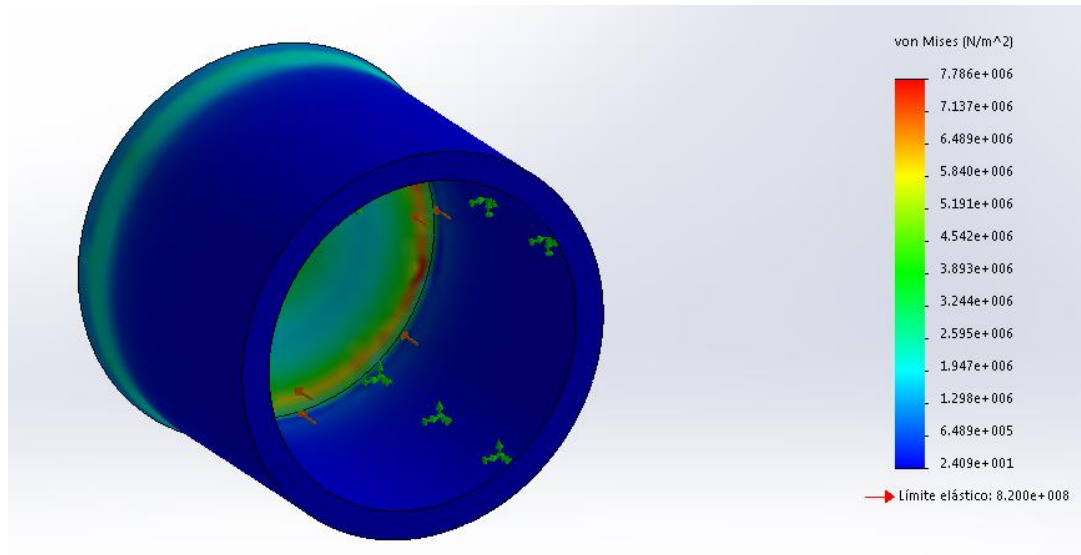


Fig. 59. Deformaciones en la tapa del muelle.

Cabezal de la herramienta

El cabezal soporta las cargas normales generadas por la pieza sobre la herramienta. Está sujeto al resto del brazo mediante un saliente que encaja en dicho brazo y un tornillo que se encarga de fijarla. La siguiente figura muestra las deformaciones que sufrirá el cabezal como consecuencia de las sollicitaciones que afectan a la herramienta.

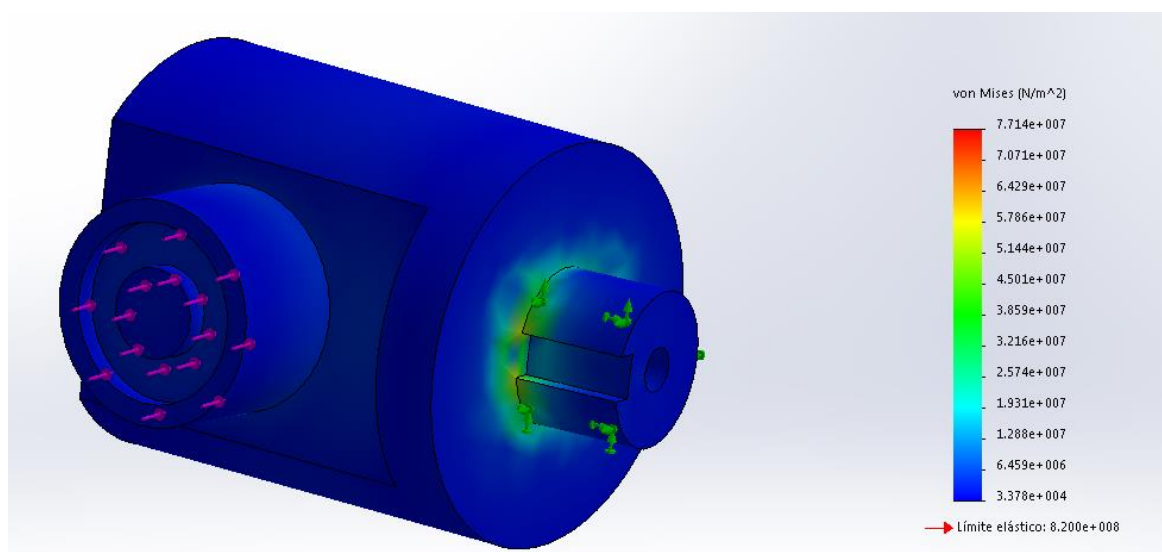


Fig. 60. Deformaciones en el cabezal de la herramienta.

4.4. TOLERANCIAS DIMENSIONALES Y GEOMÉTRICAS

TOLERANCIAS DIMENSIONALES

Las tolerancias dimensionales son la variación máxima que puede tener la medida de la pieza. Viene dada por la diferencia entre las medidas límites y coincide con la diferencia entre las desviaciones superior e inferior.

| Superficie | Característica | Símbolo de la característica | zona de tolerancia | Desviaciones permisibles | Explicación | |
|------------|----------------|------------------------------|--------------------|---|-------------|----|
| | | | | Rodamientos de la clase de tolerancia ¹⁾ | | |
| | | | | Normal, CLN | P6 | P5 |
| | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|------------------------|--|----------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|--|
| Asiento cilíndrico | | | | | | | Para exigencias normales | Para exigencias especiales de exactitud de giro o apoyo uniforme |
| Cilindricidad | | t ₁ | IT5/2 | IT4/2 | IT3/2 | IT2/2 | | |
| Variación radial total | | t ₃ | IT5/2 | IT4/2 | IT3/2 | IT2/2 | | |
| Resalte plano | | | | | | | | |
| Rectangularidad | | t ₂ | IT5 | IT4 | IT3 | IT2 | | |
| Variación axial total | | t ₄ | IT5 | IT4 | IT3 | IT2 | | |

Fig. 61. Valores de las tolerancias para la forma cilíndrica y la variación total para las diferentes clases de tolerancia de rodamientos

Rodamiento

El rodamiento, que se encarga de permitir una libre rotación del brazo de la herramienta respecto de la base de la misma, tiene que tener un ajuste con apriete tanto por el agujero interior, que se inserta en el pasador de la base de la herramienta, como por la carcasa exterior, que girará solidaria al brazo.

El ajuste con apriete es aquel en el que el diámetro del eje es mayor que el del agujero.

El juego (diferencia entre el diámetro del agujero y el del eje) es siempre negativo y corresponde a un apriete positivo.

$$\text{Apriete mínimo} = \text{Diámetro mínimo eje} - \text{diámetro máximo agujero}$$

$$\text{Apriete máximo} = \text{Diámetro máximo eje} - \text{diámetro mínimo agujero}$$

- Brazo - rodamiento: El diámetro nominal del sistema es de 14mm.

14H6k5

Agujero:

Desviación superior = 11 micrómetros [μm]

Desviación inferior = 0 micrómetros [μm]

Eje:

Desviación superior = 9 micrómetros [μm]

Desviación inferior = 1 micrómetro [μm]

Interferencia máxima = 10 micrómetros [μm]

Interferencia mínima = -9 micrómetros [μm]

AJUSTE CON APRIETE

Pieza guía

La pieza guía se encarga de transmitir la fuerza del muelle al brazo de la herramienta. Además tiene que tener control sobre el movimiento del brazo en ambos sentidos respecto de su eje.

Esta pieza ha sido diseñada para asegurar que la fuerza del muelle se transmite sobre el eje del brazo mediante un sistema de eje y agujero. Además, para asegurar que el brazo no se mueva un ángulo superior a los 90° respecto del muelle, se ha diseñado un sistema de eje-corona para asegurar el control del movimiento del brazo en ambos sentidos.

Para estos dos casos, habrá que calcular unas tolerancias con juego, ya que tienen que deslizarse entre ellas minimizando la fricción que ejercen.

- Base herramienta - Pieza guía: El diámetro nominal del sistema es de 22mm

22H7g6

Agujero:

Desviación superior = 21 micrómetros [μm]

Desviación inferior = 0 micrómetros [μm]

Eje:

Desviación superior = -7micrómetros [μm]

Desviación inferior = -20 micrómetro [μm]

Interferencia máxima = 41 micrómetros [μm]

Interferencia mínima = 7 micrómetros [μm]

AJUSTE CON JUEGO

- Pieza guía - Brazo herramienta: el diámetro nominal de la herramienta es de 18mm.

18H7g6

Agujero:

Desviación superior = 18 micrómetros [μm]

Desviación inferior = 0 micrómetros [μm]

Eje:

Desviación superior = -6micrómetros [μm]

Desviación inferior = -17 micrómetro [μm]

Interferencia máxima = 35 micrómetros [μm]

Interferencia mínima = 6 micrómetros [μm]

AJUSTE CON JUEGO

TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS

Las tolerancias geométricas hacen referencia a un estándar internacional para comunicar instrucciones acerca del diseño y manufactura de piezas. Se usan símbolos universales y definen la forma de una pieza para que funcione tal y como lo planeó el diseñador. Esta filosofía en dimensionado es una herramienta muy útil que puede resultar en una reducción en los costos de producción. La siguiente figura muestra como etiquetar correctamente las tolerancias geométricas en un plano.


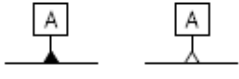
| Descripción | Símbolo |
|---------------------------------------|--|
| Indicación del elemento de tolerancia |  |
| Indicación de la referencia |  |

Fig. 62. Etiquetas para las tolerancias geométricas.

Las tolerancias geométricas pueden ser de forma, orientación, situación u oscilación, y pueden hacer referencia a una superficie o a varias, siendo una dependiente de la otra.

En el caso de las tolerancias geométricas no se requieren cálculos: Todos los valores se obtienen a partir de tablas, y dependiendo del tipo de tolerancia geométrica, que se pueden encontrar en el ANEXO 3. TABLAS DE TOLERANCIAS.

Base de la herramienta

Perpendicularidad entre el pasador y la base ($100 > L \leq 300$, K): **0,6**

Cilindricidad del cilindro (K): **0,2**

Brazo de la herramienta

Perpendicularidad entre el eje del agujero y el eje del brazo ($100 > L \leq 300$, K): **0,6**

Oscilación total (radial) entre el diámetro grande y el pequeño (K): **0,2**

Pieza guía

Debido a la importante función que realiza la pieza guía se ha considerado añadir una tolerancia geométrica para elementos asociados: La tolerancia de oscilación total (radial). Este defecto se compone del de coaxialidad y del de redondez.

Oscilación total (radial) entre el diámetro grande y el que empuja el brazo (K): **0,2**

Cilindricidad del cilindro grande (K): **0,2**

Cabezal de la herramienta

Perpendicularidad entre el eje de la rosca y la superficie planeada del cabezal ($L \leq 100$, K): **0,4**

Oscilación total (radial) entre el diámetro grande y el pequeño (K): **0,2**

5. FABRICACIÓN DE LA HERRAMIENTA

5.1. LISTA DE MATERIALES

La tabla 4 muestra un resumen de todas las piezas que conforman la herramienta y el material del que están fabricadas.

No se han incluido los elementos normalizados, ya que se comprarán al suministrador correspondiente.

Las esferas también se van a adquirir en un suministrador, pero se han mencionado en la tabla debido a que no son elementos normalizados y el material del que están fabricadas es significativo ya que hay que demandarlo específicamente a la empresa suministradora.

Tabla 4. Materiales de las distintas piezas que conforman la herramienta.

| PIEZA | MATERIAL |
|-------------------------|------------------------------------|
| Base de la herramienta | ACERO UNE F1140 |
| Brazo de la herramienta | ACERO UNE F1140 |
| Pieza guía | ACERO UNE F1140 |
| Tapa roscada | ACERO UNE F1140 |
| Cabezales herramienta | ACERO UNE F1140 |
| Casquillos | ACERO UNE F1140 |
| Esferas de rodadura | ACERO AL CROMO ENDURECIDO (100Cr6) |
| Esferas bruñidoras | ACERO AL CROMO ENDURECIDO (100Cr6) |

5.2. PIEZAS EN BRUTO

La herramienta diseñada consta de varias piezas, que se van a diferenciar individualmente y se va a hacer tanto la selección del subproducto como la hoja de ruta para cada una de ellas. Algunas de las piezas requieren soldadura, así que se hará la selección del subproducto por separado de cada una de las partes que la conformen, teniendo en cuenta que posteriormente quedarán soldadas y se convertirán en una sola pieza.

La siguiente tabla muestra las diferentes partes que componen cada una de las piezas nombradas en el presente proyecto.

Tabla 5. Desglose de cada una de las partes que conforman las piezas

| PIEZA | PARTES |
|-------------------------|--------------|
| Base de la herramienta | Cuerpo |
| | Pasador |
| | Tubo roscado |
| Tapa roscada | N/A |
| Brazo de la herramienta | N/A |
| Pieza guía | Cilindros |
| | Gancho |
| Cabezales herramienta | N/A |
| Casquillos | N/A |

Toda pieza en bruto, lleve o no posteriores operaciones de mecanizado por arranque de virutas, se debe de diseñar con unos sobreespesores, es decir, un exceso de material necesario para obtener las medidas finales deseadas así como la calidad superficial prefijada. Los sobreespesores excesivos implican aumento de precio para el fabricante. Para todos los casos se usará el mismo criterio, ya que todas las piezas están hechas de acero inoxidable.

Para crear las piezas en bruto se usará un tren de laminación de perfil, con los que se pueden obtener piezas en bruto de perfiles de forma complicada (vigas, raíles, etc).

| Pieza en bruto | Material | Sobreespesor capa superficial defectuosa (mm) | Sobreespesor general para un lado (mm) |
|-----------------|--------------------|---|--|
| Pieza laminada | Acero | 0,5 | 1-2 |
| Pieza forjada | Acero al Carbono | 1,5-3 | 2-4 |
| | Acero aleado | 2-3 | 3-5 |
| Pieza estampada | Acero al Carbono | 0,5-1 | 1-3 |
| | Acero aleado | Hasta 0,5 | 1-2 |
| Pieza fundida | Fundición gris | 1-4 | 2-5 |
| | Fundición maleable | 1-2 | 1,5-4 |
| | Acero fundido | 2-4 | 3-6 |
| | Bronce fundido | 1-3 | 2-4 |

Fig. 63. Selección de sobreespesores (apuntes de procesos de fabricación)

Para calcular los sobreespesores de los elementos roscados, se tomará como diámetro final el diámetro necesario para poder mecanizar las roscas métricas estándar. No hay que tomar el diámetro nominal de la rosca como referencia. En la siguiente tabla se muestra una tabla con las dimensiones necesarias para poder realizar un mecanizado correcto de roscas métricas estándar.

Tabla 6. Diámetros para poder mecanizar las roscas métricas estándar.

| ROSCA | MEDIDA NORMAL Y PASO FINO | DIÁMETRO BROCA AGUJERO |
|---|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Cilindro de la base con la tapa del muelle | 22 x 1.5 | 20.5 |
| Cabezal herramienta con casquillo | 10 x 0.75 | 9.5 |

Para las partes de la herramienta que tengan forma tubular no se usará el tren de laminado ya que mecanizar un tubo a partir de una pieza maciza comporta un derroche de material. Se adquirirán tubos de acero al carbono de los diámetros y espesores requeridos y se procederá a realizar las operaciones de mecanizado necesarias para conseguir las rugosidades superficiales calculadas en las piezas que lo requieran.

El caso particular de la tapa del muelle, que tiene forma tubular y además una tapa ciega por uno de sus extremos, se procederá a soldar una chapa de acero laminado. Se cortará la chapa con la forma circular y de diámetro requerido y se soldará al tubo previamente mecanizado. La figura siguiente muestra el proceso de fabricación del tubo soldado, como el que se adquirirá para la fabricación de la herramienta.

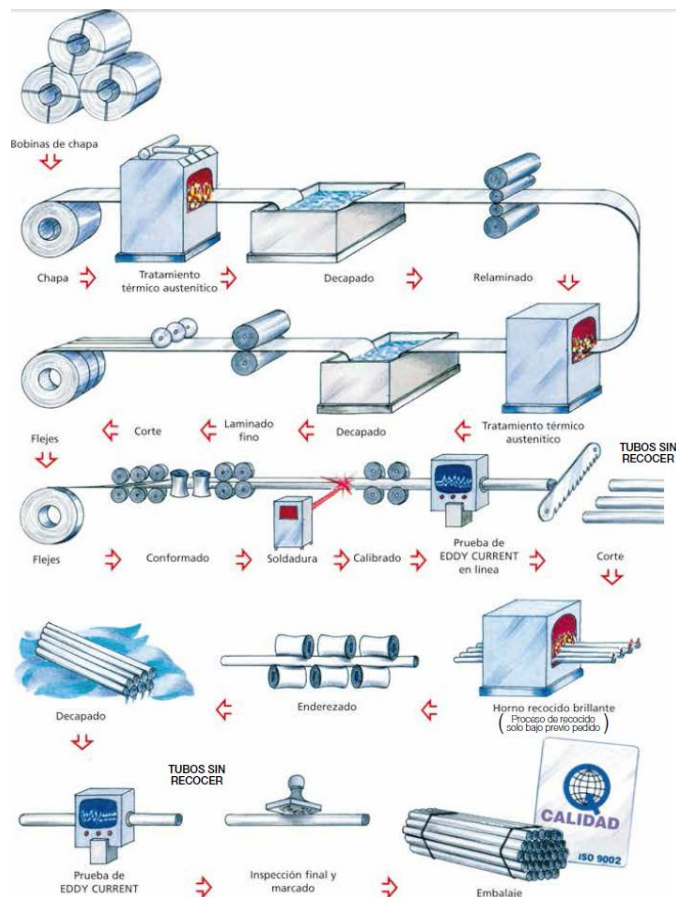


Fig. 64. Proceso de fabricación del tubo soldado.

BASE DE LA HERRAMIENTA

La morfología de la base de la herramienta no permite fabricarla como una pieza única, por ello se ha dividido en 3 partes principales que se fabricarán por separado para posteriormente ser soldadas y conformar una pieza única.

Cuerpo: La pieza en bruto tiene que tener un sobreespesor por cada cara de 0.5 mm.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 7. Características del cuerpo de la herramienta en bruto.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero UNE F1140 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Dimensiones (mm): | 19x141x61 |
| Masa (kg): | 1,28284 |
| Volumen (mm³): | 83049 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7,83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar el cuerpo.

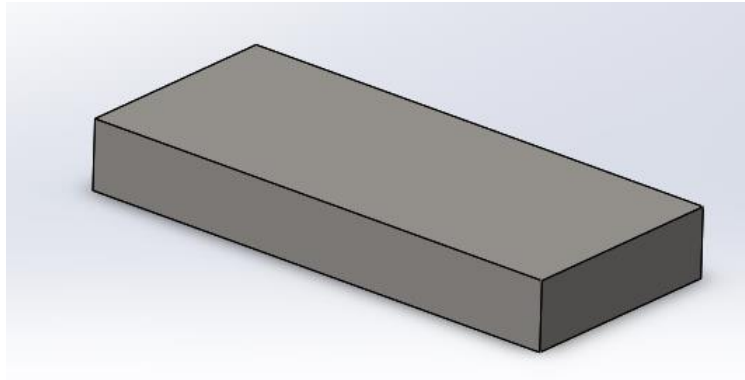


Fig. 65. Cuerpo de la herramienta en bruto.

Pasador: Se ha creído conveniente sobredimensionar la longitud de la pieza en bruto del pasador para poder fijarla al torno y así mecanizar el pasador en su plenitud sin tener que hacer cambios de posición.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 8. Características del pasador de la herramienta en bruto.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero UNE F1140 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Longitud (mm): | 30 |
| Radio (mm): | 8 |
| Masa (kg): | 0.01184 |
| Volumen (mm³): | 1507,96 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7,83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar el pasador.



Fig. 66. Pasador de la herramienta en bruto.

Cilindro: Se mecanizará el interior para asegurar el acabado superficial y se mecanizará una rosca métrica estándar.

La siguiente figura muestra una imagen del catálogo de Hastinik del cilindro que se comprará para posteriormente mecanizar el cilindro de la herramienta

| EN 10255 serie media M (DIN 2440) | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|------------|------------------------------|---------|--------------------------|--------------------------------|
| DIN | Paso nominal | ø exterior mm | Espesor mm | Diámetro exterior tolerancia | | Peso del tubo negro Kg/m | Peso del tubo galvanizado Kg/m |
| | | | | Máx. mm | Mín. mm | | |
| 10 | 3/8 | 17,2 | 2,3 | 17,5 | 16,7 | 0,84 | 0,89 |
| 15 | 1/2 | 21,3 | 2,6 | 21,8 | 21,0 | 1,21 | 1,27 |
| 20 | 3/4 | 26,9 | 2,6 | 27,3 | 26,5 | 1,56 | 1,64 |
| 25 | 1 | 33,7 | 3,2 | 34,2 | 33,3 | 2,41 | 2,51 |
| 32 | 1 1/4 | 42,4 | 3,2 | 42,9 | 42,0 | 3,10 | 3,23 |
| 40 | 1 1/2 | 48,3 | 3,2 | 48,8 | 47,9 | 3,56 | 3,71 |
| 50 | 2 | 60,3 | 3,6 | 60,8 | 59,7 | 5,03 | 5,22 |
| 65 | 2 1/2 | 76,1 | 3,6 | 76,6 | 75,3 | 6,42 | 6,67 |
| 80 | 3 | 88,9 | 4,0 | 89,5 | 88,0 | 8,36 | 8,73 |
| 100 | 4 | 114,3 | 4,5 | 115,0 | 113,1 | 12,20 | 12,68 |
| 125 | 5 | 139,7 | 5,0 | 140,8 | 138,5 | 16,60 | 17,21 |
| 150 | 6 | 165,1 | 5,0 | 166,5 | 163,9 | 19,80 | 20,52 |

Fig. 67. Cilindro de la herramienta en bruto (Catálogo hastinik acero al carbono).

TAPA ROSCADA

La tapa roscada va a ser fabricada a partir de un tubo de acero al carbono del suministrador Hastinik. Se le mecanizará una rosca métrica estándar interior del mismo diámetro nominal que al cilindro y se le soldará una tapa ciega en un extremo. Para ello se recortará un perfil circular del mismo diámetro exterior que el tubo en una chapa de acero laminado y se soldará en uno de sus extremos.

La siguiente figura muestra el tubo que se ha seleccionado para mecanizar la tapa roscada.

| EN 10255 serie media M (DIN 2440) | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|------------|------------------------------|---------|--------------------------|--------------------------------|
| DIN | Paso nominal | ø exterior mm | Espesor mm | Diámetro exterior tolerancia | | Peso del tubo negro Kg/m | Peso del tubo galvanizado Kg/m |
| | | | | Máx. mm | Mín. mm | | |
| 10 | 3/8 | 17,2 | 2,3 | 17,5 | 16,7 | 0,84 | 0,89 |
| 15 | 1/2 | 21,3 | 2,6 | 21,8 | 21,0 | 1,21 | 1,27 |
| 20 | 3/4 | 26,9 | 2,6 | 27,3 | 26,5 | 1,56 | 1,64 |
| 25 | 1 | 33,7 | 3,2 | 34,2 | 33,3 | 2,41 | 2,51 |
| 32 | 1 1/4 | 42,4 | 3,2 | 42,9 | 42,0 | 3,10 | 3,23 |
| 40 | 1 1/2 | 48,3 | 3,2 | 48,8 | 47,9 | 3,56 | 3,71 |
| 50 | 2 | 60,3 | 3,6 | 60,8 | 59,7 | 5,03 | 5,22 |
| 65 | 2 1/2 | 76,1 | 3,6 | 76,6 | 75,3 | 6,42 | 6,67 |
| 80 | 3 | 88,9 | 4,0 | 89,5 | 88,0 | 8,36 | 8,73 |
| 100 | 4 | 114,3 | 4,5 | 115,0 | 113,1 | 12,20 | 12,68 |
| 125 | 5 | 139,7 | 5,0 | 140,8 | 138,5 | 16,60 | 17,21 |
| 150 | 6 | 165,1 | 5,0 | 166,5 | 163,9 | 19,80 | 20,52 |

Fig. 68. Tapa roscada en bruto (Catálogo Hastinik acero al carbono).

BRAZO DE LA HERRAMIENTA

Se ha creído conveniente dejar 1 mm de sobreespesor en el radio y 1 mm de espesor por cada extremo de la pieza.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 9. Características del brazo de la herramienta en bruto.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero UNE F1140 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Longitud (mm): | 282 |
| Radio (mm): | 19 |
| Masa (mm): | 0,62765 |
| Volumen (mm³): | 79955,10 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7,83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar el brazo de la herramienta.

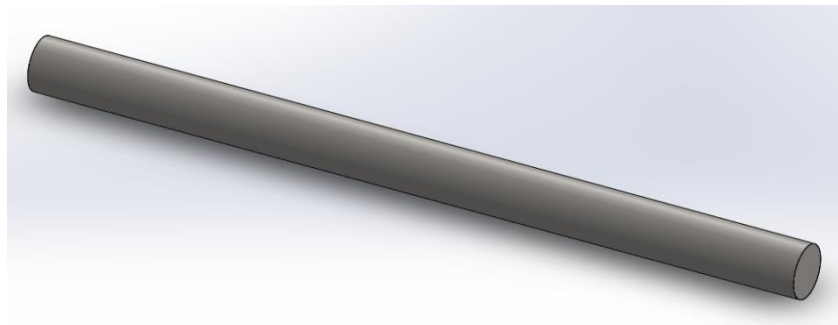


Fig. 69. Brazo de la herramienta en bruto.

PIEZA GUÍA

Cilindros: La pieza guía tiene 3 cambios bruscos de diámetro, que se mecanizarán a partir de la misma pieza en bruto y se arrancará el material que sea necesario.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 10. Características de los cilindros de la pieza guía en bruto.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero AISI F114 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Longitud (mm): | 37 |
| Radio (mm): | 23 |
| Masa (mm): | 0,12067 |
| Volumen (mm³): | 15372,60 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7.83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar los cilindros de la pieza guía.

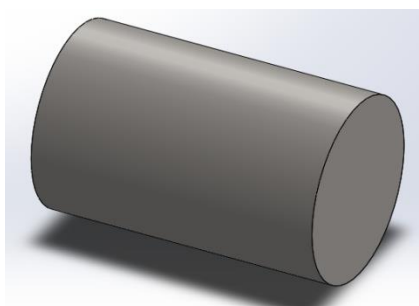


Fig. 70. Cilindros de la pieza guía en bruto.

Gancho: Debido a que la función del gancho es sujetar el brazo para evitar que se mueva, pero permitiendo un fácil montaje de la herramienta, no tiene que transmitir grandes esfuerzos ni deslizarse sobre el brazo con un ajuste determinado. Se ha optado por cortar tubos y obtener la forma de gancho para que después sea soldado a los cilindros.

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar el gancho de la pieza guía.

EN 10255 serie media M (DIN 2440)

| DIN | Paso nominal | e exterior mm | Espesor mm | Diámetro exterior tolerancia | | Peso del tubo negro Kg/m | Peso del tubo galvanizado Kg/m |
|-----|--------------|---------------|------------|------------------------------|---------|--------------------------|--------------------------------|
| | | | | Máx. mm | Mín. mm | | |
| 10 | 3/8 | 17,2 | 2,3 | 17,5 | 16,7 | 0,84 | 0,89 |
| 15 | 1/2 | 21,3 | 2,6 | 21,8 | 21,0 | 1,21 | 1,27 |
| 20 | 3/4 | 26,9 | 2,6 | 27,3 | 26,5 | 1,56 | 1,64 |
| 25 | 1 | 33,7 | 3,2 | 34,2 | 33,3 | 2,41 | 2,51 |
| 32 | 1 1/4 | 42,4 | 3,2 | 42,9 | 42,0 | 3,10 | 3,23 |
| 40 | 1 1/2 | 48,3 | 3,2 | 48,8 | 47,9 | 3,56 | 3,71 |
| 50 | 2 | 60,3 | 3,6 | 60,8 | 59,7 | 5,03 | 5,22 |
| 65 | 2 1/2 | 76,1 | 3,6 | 76,6 | 75,3 | 6,42 | 6,67 |
| 80 | 3 | 88,9 | 4,0 | 89,5 | 88,0 | 8,36 | 8,73 |
| 100 | 4 | 114,3 | 4,5 | 115,0 | 113,1 | 12,20 | 12,68 |
| 125 | 5 | 139,7 | 5,0 | 140,8 | 138,5 | 16,60 | 17,21 |
| 150 | 6 | 165,1 | 5,0 | 166,5 | 163,9 | 19,80 | 20,52 |

Fig. 71. Gancho de la pieza guía en bruto.

CABEZAL HERRAMIENTA

Punta: Se ha creído conveniente sobredimensionar la pieza en bruto 1mm de radio y 2 mm de largo.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 11. Características de la punta del cabezal en bruto.

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero AISI F114 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Longitud (mm): | 27 |
| Radio (mm): | 19 |
| Masa (mm): | 0,06009 |
| Volumen (mm³): | 7655,28 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7.83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar la punta del cabezal de la herramienta.

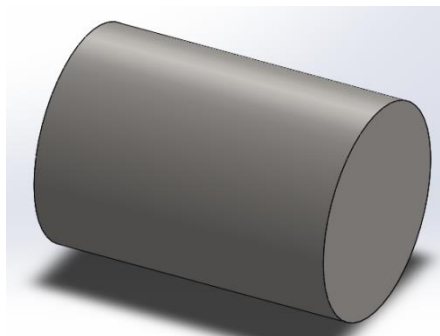


Fig. 72. Punta del cabezal en bruto.

Rosca: Se ha creído conveniente sobredimensionar la pieza en bruto 1mm por cada extremo y 0.5 mm de radio.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 12. Características de la rosca del cabezal en bruto.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero AISI F114 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Longitud (mm): | 15 |
| Radio (mm): | 12 |
| Masa (mm): | 0,01332 |
| Volumen (mm³): | 791,68 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7.83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar la rosca del cabezal de la herramienta.

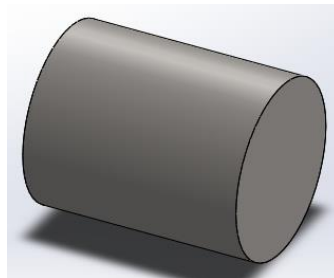


Fig. 73. Rosca del cabezal en bruto.

CASQUILLO HERRAMIENTA

Se ha creído conveniente sobredimensionar la pieza en bruto 1mm por cada extremo y 1mm en el diámetro.

La siguiente tabla muestra las características más importantes de la pieza en bruto.

Tabla 13. Características del casquillo en bruto.

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Material: | Acero AISI F114 |
| Precio Material (€/kg): | 2 |
| Longitud (mm): | 17 |
| Radio (mm): | 16 |
| Masa (mm): | 0,02683 |
| Volumen (mm³): | 3418,05 |
| Densidad (Kg/mm³) | 7.83E-6 |

La siguiente figura muestra una simulación de la pieza en bruto que se usará para mecanizar el casquillo de la herramienta.

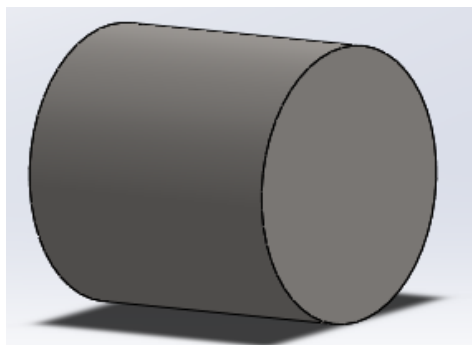


Fig. 74. Casquillo en bruto.

5.3. HOJAS DE RUTA

Las hojas de ruta de cada una de las piezas que conforman la herramienta se pueden encontrar en el anexo 2 de este trabajo (ANEXO2. HOJAS DE RUTA).

Se ha usado la herramienta que proporciona Sandvik Coromant en su página web para el cálculo de los parámetros de corte que aparecen en la hoja de ruta. La siguiente figura muestra una captura de pantalla de la herramienta de cálculo de los parámetros de corte que ha sido utilizada para completar la hoja de ruta de este proyecto.



Fig. 75. Herramienta de cálculo de Sandvik Coromant

Las máquinas herramienta que se han tomado como referencia para mecanizar las piezas son las que proporciona Sandvik, así como las herramientas de corte.

6. VALORACIÓN ECONÓMICA

Con el objetivo de realizar una estimación económica ajustada se han tenido en cuenta todos los procesos requeridos en la fabricación de la herramienta que se ha diseñado previamente, así como los costes del material requerido para la fabricación de esta.

Los costes de fabricación han sido calculados tomando como referencia que solo habría un operario mecanizando las piezas.

6.1. SUBPRODUCTO

Sabiendo la masa de subproducto utilizada en las piezas en bruto y la masa de de cada una de las partes que conforman la herramienta finalizadas, podemos calcular el aprovechamiento del material.

El aprovechamiento del material se define como:

$$(15) \quad A = \frac{M_{pt}}{M_{pb}} \cdot 100\%$$

Donde, M_{pt} es la masa de la pieza terminada y M_{pb} la masa de la pieza en bruto.

La valoración económica está definida por el proceso de fabricación del subproducto, en este caso mediante laminado.

La valoración económica para el laminado se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$(16) \quad C_{pbl} = M_{pb} \cdot \left(\frac{P_1}{1000} \right) - (M_{pb} - M_{pt}) \cdot \left(\frac{S}{1000} \right)$$

Donde, P es el precio medio de una tonelada de acero laminado y S es el precio de una tonelada de los residuos del material.

Se ha calculado un precio medio de 1200€/tonelada de acero laminado y 250€/tonelada de los residuos de dicho material.

La siguiente tabla muestra el aprovechamiento y la valoración económica de cada una de las piezas teniendo en cuenta una producción en serie, en la que se pudiese comprar el acero por toneladas.

Tabla 14: Aprovechamiento y valoración económica de las piezas.

| PIEZA | PARTES | Mpt (kg) | Mbp (kg) | APROVECHA MIENTO (%) | VALORACIÓN ECONÓMICA (€) |
|----------------------------|---------|-------------|-------------|----------------------------|--------------------------------|
| Base de la herramienta | Cuerpo | 0,89019 | 1,28284 | 101,36 | 2,466 |
| | Pasador | 0,00544 | 0,01184 | 45,95 | 0,022 |
| Brazo de la herramienta | N/A | 0,53616 | 0,62765 | 85,42 | 1,232 |
| Pieza guía | N/A | 0,04963 | 0,12067 | 41,13 | 0,223 |
| Cabezal herramienta | N/A | 0,03807 | 0,06009 | 63,35 | 0,114 |
| Casquillo | N/A | 0,00894 | 0,01332 | 67,12 | 0,025 |
| TOTAL (€/herramienta) | | | | | 4,08 |

El precio en acero de la herramienta en bruto es muy bajo debido a que ha sido presupuestado para una producción en serie, por lo tanto se ha decidido no tenerlo en cuenta en el presupuesto final.

6.2. COSTES ASOCIADOS A LA FABRICACIÓN

Se han calculado los parámetros de corte para que las herramientas trabajen a vida infinita, así que se ha considerado que no hay gastos por desgaste de la máquina-herramienta o de las plaquitas. Debido a que se ha dado preferencia a optimizar el proceso de mecanizado, no se ha tenido en cuenta el presupuesto en la selección de las herramientas o la maquinaria. En este caso tampoco se tendrá en cuenta el precio de las herramientas seleccionadas porque dependiendo de las preferencias de fabricación se modificarían los parámetros de corte para conseguir mayor producción o se usarían las herramientas que se tuviesen a disposición para abaratar costes.

Los costes asociados a la fabricación hacen referencia al tiempo que el operario necesitaría para fabricar la herramienta: Tiempo total de mecanizado y cambio de herramientas.

La siguiente tabla muestra el precio total de fabricación de la herramienta de bruñido de interiores diseñada en el presente proyecto:

Tabla 15: Costes de fabricación de la herramienta.

| PIEZA | TIEMPO TOTAL DE MECANIZADO (min) | CAMBIO DE HERRAMIENTAS Y COLOCACION EN LAS MÁQUINAS (min) | €/HORA | PRECIO FINAL DE FABRICACIÓN |
|---------------------------|----------------------------------|---|--------|-----------------------------|
| BASE DE LA HERRAMIENTA | 1.23 | 150 | 35 | 105€ |
| TAPA ROSCADA | 0.154 | 90 | 35 | 70€ |
| BRAZO DE LA HERRAMIENTA | 0.38 | 70 | 35 | 70€ |
| PIEZA GUÍA | 0.144 | 100 | 35 | 70€ |
| CABEZAL DE LA HERRAMIENTA | 0.743 | 150 | 35 | 105€ |
| CASQUILLO | 0.238 | 50 | 35 | 35€ |
| IVA (21%) | | | | 96€ |
| TOTAL | | | | 551€ |

6.3. COSTES DE INGENIERÍA Y PROTOTIPADO

Los costes de ingeniería se encuentran desglosados en la siguiente tabla:

Tabla 16: Costes de ingeniería.

| PIEZA | TIEMPO TOTAL DE DISEÑO (h) | €/HORA | PRECIO FINAL DE INGENIERÍA |
|---------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|
| BASE DE LA HERRAMIENTA | 10 | 25 | 250€ |
| TAPA ROSCADA | 5 | 25 | 125€ |
| BRAZO DE LA HERRAMIENTA | 8 | 25 | 200€ |
| PIEZA GUÍA | 11 | 25 | 275€ |
| CABEZAL DE LA HERRAMIENTA | 12 | 25 | 300€ |
| CASQUILLO | 5 | 25 | 125€ |
| IVA (21%) | | | 267.75 € |
| TOTAL | | | 1542.75 € |

El prototipado es muy útil para aportar una imagen física tridimensional del diseño que se ha llevado a cabo, para presentarlo a inversores u obtener una idea más completa del producto final.

La siguiente tabla muestra los costes asociados al prototipado de la herramienta diseñada:

Tabla 20: Costes del prototipo.

| TIPO | PRECIO | UNIDADES | TOTAL |
|---------------|------------|----------|----------|
| IMPRESIÓN | 15€/h | 20 h | 300 € |
| BOBINA DE PLA | 15.84€/ud. | 1 ud. | 15.84 € |
| IVA (21%) | | | 63 € |
| TOTAL | | | 299.38 € |

6.4. PRESUPUESTO FINAL

Los costes totales del presente proyecto se pueden encontrar en la siguiente tabla.

Tabla 21: Costes totales.

| TIPO | VALOR |
|------------|-----------|
| PRODUCCIÓN | 551 € |
| PROTOTIPO | 299.38 € |
| INGENIERÍA | 1542.75 € |
| TOTAL | 2393 € |

7. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL

El impacto ambiental asociado a la fabricación de la herramienta diseñada en el presente proyecto va a ser examinado a continuación.

La herramienta está hecha de:

1689,15 gramos de Acero F1140: Este acero que se puede vender como chatarra. De esta manera, el acero sobrante en la fabricación en forma de viruta, así como la propia herramienta una vez se haya roto, pueden ser refundidas.

Rodamiento de agujas SKF: No se cambia excepto si se rompe.

Tornillo allen din 912: No se cambia excepto si se rompe.

En cuanto a la fabricación del acero usado para las piezas en bruto:

El hierro producido en los altos hornos es refinado mediante el proceso de fabricación de acero, en el que es eliminada la mayor parte del carbón que se disolvió en el hierro líquido. En las plantas antiguas, el proceso de fabricación de acero todavía emplea el hogar abierto, pero en las plantas nuevas el método favorito es el del horno básico de oxígeno; se emplea oxígeno para quemar el carbón que está disuelto en el hierro. En ambos procesos, se producen grandes cantidades de gases que contienen monóxido de carbono y polvo. Estos gases pueden ser reciclados después de eliminar el polvo, dañinos al aire y a la producción de granos.

Desechos sólidos

Las fábricas de hierro y acero producen grandes cantidades de desechos sólidos, como escoria de horno alto, que puede ser utilizada para producir ciertos tipos de cemento, si se granula correctamente. La escoria básica, otro desecho sólido, se emplea como fertilizante, y se produce al utilizar los minerales de hierro que poseen un alto contenido de fósforo.

Desechos líquidos

Los solventes y ácidos que se utilizan para limpiar el acero son, potencialmente, peligrosos, y deben ser manejados, almacenados y eliminados como tal. Algunos de los subproductos que se recuperan son peligrosos o carcinogénicos, y se debe tomar las medidas adecuadas para recolectar, almacenar y despachar estos productos. Es necesario monitorear las fugas de líquidos y gases.

Reducción de los desechos

Si no se toman las medidas apropiadas, la contaminación atmosférica puede convertirse en un problema muy serio. Será necesario, durante la etapa de diseño, estudiar formas de reducir la contaminación atmosférica, mediante el uso de equipos especiales que eliminaran el polvo seco, para separar los gases y recuperar los químicos valiosos, y remover los contaminantes tóxicos y recolectar los gases que contienen monóxido de carbono e hidrógeno, a fin de utilizarlos como combustibles secundarios en la planta, o para producir otros químicos (p.ej., metanol y amoníaco). Estas medidas pueden reducir la contaminación atmosférica y aumentar la eficiencia energética. Los químicos que causan contaminación atmosférica son: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, benceno, tolueno, xileno, naftaleno, fenoles, benzopirina, cianuro, sulfuro de hidrógeno, y los compuestos de plomo y cinc.

Se emplean grandes cantidades de agua en la fabricación de hierro y acero. Es necesario contar con sistemas de tratamiento de aguas servidas para todos los procesos de fabricación de hierro y acero, y se debe estudiar la forma de reciclar el agua servida y tratada. Debido al alto contenido de sólidos de las aguas negras que se emplean para lavar los gases, es necesario incluir amplias instalaciones de coagulación y asentamiento.

Otro punto que cabe destacar en el análisis del impacto ambiental es la energía eléctrica que consumen los motores de las máquinas-herramienta utilizadas en el mecanizado de la herramienta diseñada.

El torno y la fresa seleccionados tienen una potencia de 25 y 28 kW respectivamente. El tiempo total de mecanizado es inferior a los 5 min por herramienta, así que podemos concluir que no genera un impacto ambiental grave. En el caso de una producción en serie se debería hacer un estudio en más profundidad.

8. CONCLUSIONES

Una vez acabado el proyecto, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Se ha diseñado con éxito herramienta capaz de llevar a cabo el proceso de bruñido con bola en el interior de cilindros de diferentes diámetros. Dicha herramienta se coloca en el carro portaherramientas, que permite variar la posición de la misma dependiendo del diámetro interior a bruñir.
2. Se ha realizado una correcta selección de materiales, siendo el acero UNE F1140 el elegido para la fabricación de la herramienta, al tratarse de un material muy utilizado en *toolmaking* por su fácil maquinabilidad y su bajo coste.
3. Se han realizado los cálculos correspondientes para determinar los factores de seguridad y evitar sobredimensionamientos no intencionados. Hay piezas con factores de seguridad elevados, necesarios para cumplir los requisitos del diseño, ya que se han calculado las piezas críticas en primer lugar, y el resto de la herramienta ha sido dimensionada en consecuencia.
4. Se han simulado mediante SolidWorks las deformaciones para comprobar que el estudio de diseño se ha realizado correctamente.
5. Se ha diseñado un sistema para poder aplicar distintas fuerzas de bruñido con el objetivo de poder bruñir cilindros de distintos materiales. En este caso se ha aprovechado la capacidad compresiva del muelle empleado, relacionándola con su desplazamiento. Mediante un sistema en el que un muelle se encuentra precargado por una tapa roscada se ha conseguido variar la fuerza de bruñido variando las vueltas de rosca de la tapa.
6. Se ha realizado un estudio de las piezas en bruto y posteriormente las correspondientes hojas de ruta para poder fabricar la herramienta mediante torno y fresa.

9. TRABAJOS FUTUROS

Todos los objetivos propuestos han sido cumplidos en el presente proyecto, pero aún así el alcance real de dicho proyecto supera el abasto establecido al principio del mismo.

Por este motivo, se puede plantear un listado de posibles aspectos a estudiar en trabajos futuros:

1. Diseño de distintos cabezales para bolas bruñidoras de varios diámetros: El cabezal diseñado contiene una bola bruñidora de 10mm de diámetro y ha sido diseñado de tal forma que pueda extraerse del resto de la herramienta, para permitir intercambiarlo por otro cabezal y conseguir distintos tipos de bruñido con la misma herramienta. Se recomienda diseñar cabezales para bolas bruñidoras de 8, 10 y 12 mm, que al parecer, ofrecen buenos resultados de bruñido, tal como se ha visto en la bibliografía consultada.
2. Fabricación de la herramienta con el material presentado y validado mediante cálculos. Las hojas de ruta están disponibles en el anexo 2.
3. Realizar la calibración del muelle de precarga. El muelle ha sido seleccionado por sus especificaciones funcionales, que lo habilitan para realizar una fuerza de 306N con una precarga del 40% de su longitud total. Aun así, habría que calibrarlo in situ ya, que el sistema de medición de la herramienta se basa en las vueltas de rosca de la tapa.
4. Realización de pruebas de bruñido de interiores en distintos metales para comprobar las bondades del proceso, a través de los múltiples indicadores que aparecen publicados en la literatura científica especializada.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R.L. Murphy y B. Kotiveerachari, "Burnishing of metallic surfaces", 1981.
- [2] N. H. Loh y S. C. Tam, "Effects of ball burnishing parameters on surface finish", 1988.
- [3] N. H. Loh, S. C. Tam y S.Miyazawa, "Surface hardening by ball burnishing", 1990
- [4] R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez y L.N.López de Lacalle, "Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue of medium carbon AISI 1045 steel", 2015.
- [5] H. Hamadache et al., "Characteristics of the surface layer of steel Rb40 under friction of balls and rollers", 2006.
- [6] Yen, Y. C. y ALTAN, T., "Finite Element Modeling of the Roller Burning Process", 2005.
- [7] Adel Mahmood Hassan y Sulieman Z.S. Al-Dhi, "Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnish process", 1999.
- [8] Morimoto, T. y Tamamura, K. "Effect of the material-tool on the burnishing process", 1991.
- [9] M.H. El-Axir, O.M. Othman y A.M. Abodiena. "Improvements in the surface quality and micro hardnesses of interior surfaces through burnishing process", 2002.
- [10] Fang-Jung Shiou and Chuang-Hsiung Chuang, "Surface precision finishing using an innovative method of burnishing with ball with vibration driver", 2010.
- [11] Trabajo de final de grado. Julio Llamazares Navarro, "Diseño de una herramienta de bruñido con control de fuerza y presión hidráulica", 2011.
- [12] Trabajo de final de grado. Oriol Casadesús Farràs y Manel Madueño Guerrero, "Rediseño y puesta a punto de una herramienta de bruñido con bola para torno", 2016.
- [13] (15/06/2017) Momento de inercia de diversos sistemas continuos.
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Momento_de_inercia_de_diversos_sistemas_continuos_\(GIC\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Momento_de_inercia_de_diversos_sistemas_continuos_(GIC))
- [14] (21/06/2017) Catálogo SKF de rodamientos. Rodamiento de agujas NX 7 ZTX.
<http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/roller-bearings/needle-roller-bearings/combined-needle-roller-bearings/needle-roller-thrust-rolling-bearings/index.html?designation=NX%207%20ZTN>
- [15] (21/06/2017) Aceros griñón: Acero F114.
<http://www.acerosgrinon.com/productos/laminadosyforjados/f114>
- [16] (22/06/2017) Materiales utilizados y tensiones admisibles.
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3968/fichero/Memoria%252F6+-+Materiales+utilizados+y+tensiones+admisibles.pdf>
- [17] (07/08/2017) Tornillería reche: tornillo con cabeza cilíndrica allen din 912.

<http://www.tornilleriareche.com/tornillo-cabeza-cilindrica-allen-din-912-producto>

- [18] (11/08/2017) Bricovalle: Broca diamantada redonda.

<https://www.bricovalle.com/brocas-lijas-muelas/28212-brocas-diamantadas-redondas/28212-p-2120.html?osCsid=mn307dmakgk4hmmu2q896kvl13>

- [19] (28/08/2017) Index mundi: Precio del acero laminado.

<http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=acero-laminado-en-caliente&meses=120&moneda=eur>

- [20] (03/09/2017) Impactos ambientales de la fabricación del hierro y el acero.

https://es.wikibooks.org/wiki/Impactos_ambientales/Fabricaci%C3%B3n_de_hierro_y_acero#Producci.C3.B3n_de_acero